

Série A. N° 872

N° D'ORDRE : 1674

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR M. EUGÈNE-LOUIS DUPUY

LICENCIÉ ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
DES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

2^e THÈSE. — PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES ALLIAGES.

Soutenues le 23 AVR 1921, devant la Commission d'examen

MM. LIPPMANN,

Président.

KOENIGS,

H. LE CHATELIER,

} *Examineurs.*

ANGERS

IMPRIMERIE F. GAULTIER

4, RUE GARNIER, 4

—
1921

Série A. N° 872

N° D'ORDRE : 1674

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR M. EUGÈNE-LOUIS DUPUY

LICENCIÉ ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

- 1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES
DES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.
- 2^e THÈSE — PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES ALLIAGES.

Soutenues le 23 AVR 1921, devant la Commission d'examen



MM. LIPPMANN,

KOENIGS,

H. LE CHATELIER,

Président.

Examineurs.

ANGERS

IMPRIMERIE F. GAULTIER

4, RUE GARNIER, 4

1921

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen MOLLIARD, *Professeur*. Physiologie végétale.

Doyen honoraire P. APPELL.

Professeurs honoraires } P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
BOUTY.

Professeurs LIPPMANN Physique
E. PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
Gaston BONNIER Botanique.
KÖENIGS Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER Chimie organique.
JOANNIS Chimie (Enseignement P. C. N.)
JANET Electrotechnique générale.
WALLERANT Minéralogie.
ANDOYER Astronomie.
PAINLEVÉ Mécanique analytique et mécanique céleste.
HAUG Géologie.
H. LE CHATELIER . . . Chimie générale.
Gabriel BERTRAND . . . Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE Physique générale.
CAULLERY Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ Chimie appliquée.
G. URBAIN Chimie minérale.
Émile BOREL Calcul des probabilités et Physique mathématique.
MARCHIS Aviation.
Jean PERRIN Chimie physique.
G. PRUVOT Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
MATRUCHOT Botanique.
ABRAHAM Physique.
CARTAN Mécanique rationnelle.
Cl. GUICHARD Géométrie supérieure.
LEBESGUE Application de l'analyse à la géométrie.
LAPICQUE Physiologie.
GENTIL Géographie physique.
VESSIOT Calcul différentiel et calcul intégral.
COTTON Physique théorique et physique céleste.
DRACH Mathématiques générales.
C. FABRY Physique.
N... Histologie.
N... Zoologie, anatomie, physiologie comparée.

Professeurs adjoints . } LEDUC Physique.
HÉROUARD Zoologie.
LÉON BERTRAND Géologie.
Rémy PERRIER Zoologie (Enseignement P. C. N.)
LESPIEAU Chimie.
SAGNAC Physique théorique et physique céleste.
PEREZ Zoologie (Evolution des êtres organisés).
RABAUD Biologie générale.
PORTIER Physiologie.
BLAISE Chimie organique.
PÉCHARD Chimie (Enseignement P. C. N.).

Secrétaire Daniel TOMBECK.

Recherches expérimentales
sur les propriétés mécaniques des aciers
aux températures élevées.

A MON MAITRE

M. HENRY LE CHATELIER

MEMBRE DE L'INSTITUT

Respectueux hommage.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41556008_0025

Recherches expérimentales sur les propriétés mécaniques des aciers aux températures élevées.

o o o o o

HISTORIQUE

Les publications relatives aux propriétés mécaniques des aciers à chaud sont relativement peu nombreuses; et encore, les essais ont généralement été arrêtés vers 750° , c'est-à-dire au voisinage, sinon au-dessous des points de transformation à l'échauffement. Nous n'en retiendrons que quelques-uns.

Vallon (1875), signale une fragilité particulière de l'acier au bleu et cite l'expérience suivante : si l'on prend une tige de fer ou d'acier chauffée au rouge et que, tout en la laissant refroidir, on lui fait subir une suite de pliages à bloc, on constate que pour une certaine température, qui correspond au bleu, on observe des criques sur la partie déformée, tandis que les pliages faits plus haut ou plus bas n'ont produit aucun accident.

Ledebur, à propos des métaux rouverins, remarque que pour certains d'entre eux, la perte de malléabilité n'a lieu que pour une certaine zone de température, et qu'ils retrouvent au-dessus et au-dessous toutes leurs qualités.

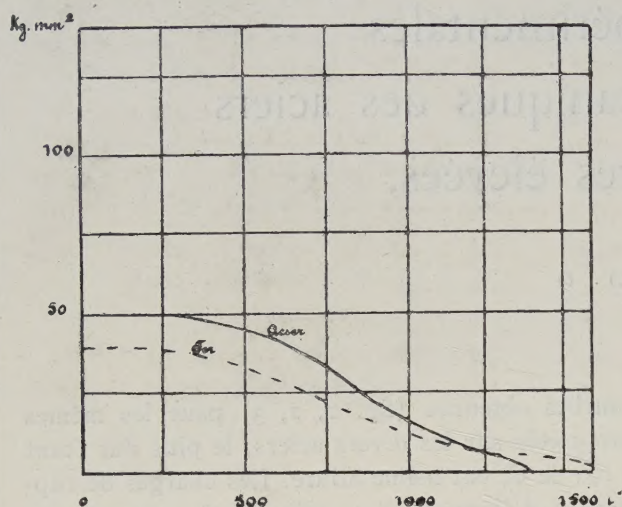
Codron (1896), a étudié les charges nécessaires pour réduire de moitié par compression lente la hauteur de cylindres de fer et d'acier de diverses nuances, les charges de rupture et la striction de ces mêmes métaux. Les mesures ont été faites jusqu'à 1.500° . Les températures ont été mesurées à l'œil d'après la couleur des éprouvettes; on peut donc admettre qu'elles sont entachées d'erreurs atteignant plusieurs centaines de degrés. Les

courbes obtenues (fig. 1, 2, 3) pour les mêmes propriétés sur les divers aciers, le plus dur étant à 0,6 de C, ont même allure. Les charges de rupture et d'écrasement se relèvent un peu presque vers 300° puis diminuent d'abord rapidement, puis plus lentement, pour s'annuler vers 1.500° . Les courbes de striction, d'allure plus complexe, d'abord horizontales, s'abaissent vers 250° , présentant un minimum à 375° , et montent ensuite pour atteindre 90 % à 550° . Elles retombent à zéro entre 1.200 et 1.300° .

M. André Le Chatelier, en 1900, a publié une importante étude sur les propriétés mécaniques des aciers à haute température. Les essais ont porté sur des aciers doux laminés. La striction, d'abord légèrement décroissante lorsque la température s'élève, marque un minimum assez brusque vers 450° . Elle remonte ensuite rapidement, s'infléchit vers 900° et remonte pour atteindre 95 % vers 1.200° . Les températures ont été mesurées très exactement à l'aide d'un couple H. Le Chatelier, mais, les points expérimentaux, peu nombreux dans la région des points critiques, ne donnent que l'allure générale du phénomène.

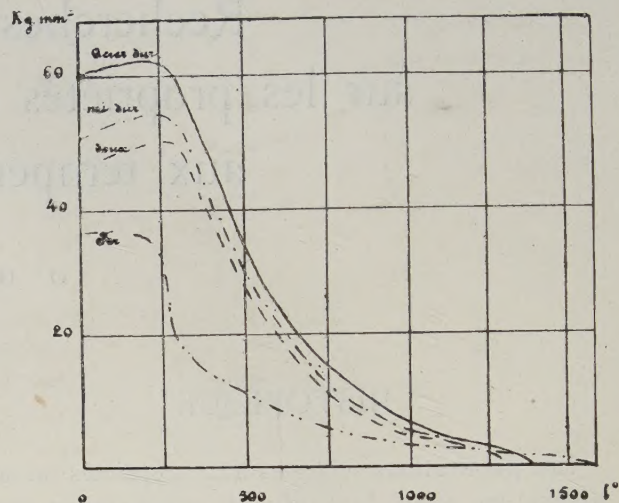
M. Brinell (1905), a étudié la dureté à la bille à différentes températures de deux aciers à 0,17 % de C. Les courbes montrent un relèvement de dureté vers 250° , suivi, à partir de 500° , d'une décroissance d'abord rapide, puis plus lente.

Robin (1908), en mesurant la dureté des aciers de diverses nuances trempés et non trempés, a obtenu des résultats sensiblement analogues (fig. 4).



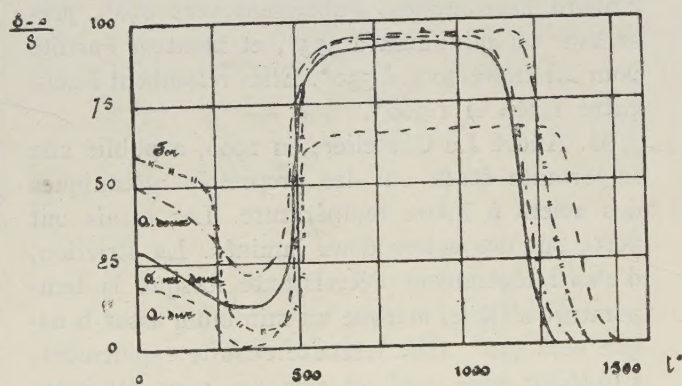
Résistance à l'écrasement.

Fig. 1.



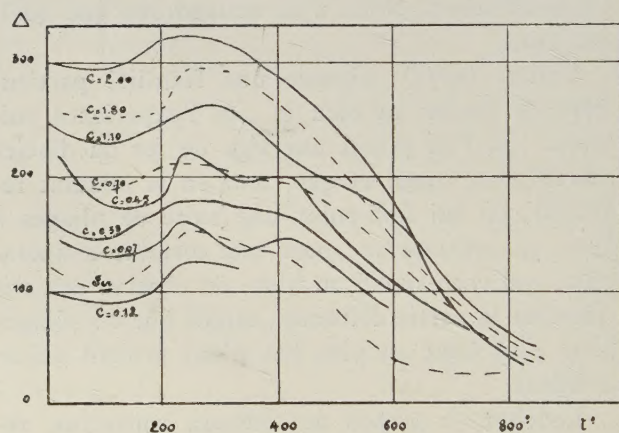
Charge de rupture.

Fig. 2.



Coefficient de ductilité.

Fig. 1 à 3. — Expériences de Codron.



Nombre de dureté.

Fig. 4. — Expériences de F. Robin.

MM. Guillet et Revillon (1909), donnent les valeurs de la résilience pour divers aciers entre la température ordinaire et 600°. Les diverses courbes, après un léger maximum vers 180°, s'infléchissent jusqu'à 500° et remontent ensuite rapidement.

En résumé, on peut donc retenir de ces divers

essais et observations, que l'acier présente vers 300-400° une « fragilité au bleu » caractérisée par une augmentation de la charge de rupture et un minimum de striction très marqué, suivi d'une diminution régulière de la charge de rupture et d'une augmentation de la striction, cette dernière atteignant 95 et 100 % vers 1.000-1.300°.

Par contre, le passage par les points de transformation n'est signalé par aucune anomalie particulière.

MM. Rosenhain et Humphrey (1913), dans le but d'étudier l'influence des points de transformation sur la charge de rupture du fer et le mécanisme de sa rupture ont fait des expériences extrêmement précises. Ils ont opéré sur des lames de fer électrolytiques ou d'acier extra-doux à 0,1 de C. La section de rupture était d'environ $1 \times 3,18$ mm. Pour éviter l'oxydation le four et l'éprouvette étaient placés dans le vide. Les mesures ont

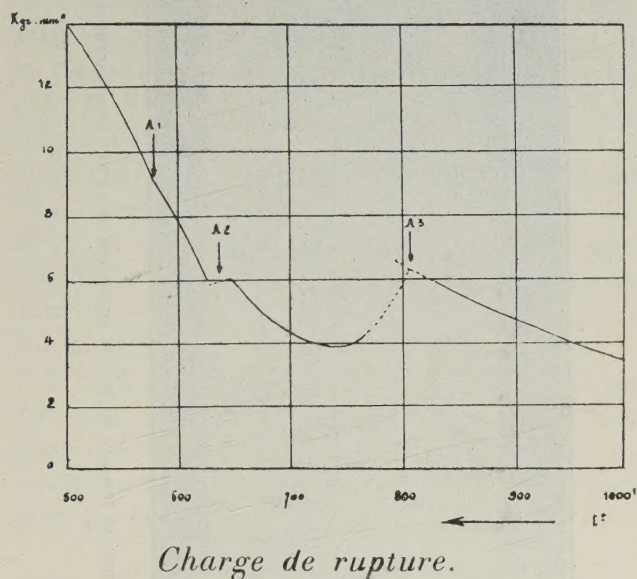


Fig. 5. — Expériences de Rosenhain et Humphrey

été faites à température descendante, les éprouvettes étant chauffées à 1.100° puis refroidies jusqu'à la température désirée. Les charges de rupture ont seules été observées. En effet, les mesures des allongements ont donné des résultats irréguliers et les strictions n'ont pas été mesurées. La figure 5 résume les résultats obtenus.

La courbe température-charge de rupture montre deux discontinuités parfaitement établies et une troisième douteuse. Les deux premières discontinuités correspondraient respectivement aux températures des points Ar_1 et Ar_2 du métal en expérience, mais la troisième se produit 30° environ plus haut que Ar_3 .

Comme nous l'exposerons dans nos conclusions, nous ne sommes pas complètement d'accord avec les auteurs quant à la correspondance entre les accidents et le point critique du métal.

Enfin, tout récemment, et alors que cette étude était presque terminée, nous avons eu communication d'un mémoire présenté à la Société des Ingénieurs Civils, par M. Gouvy, et donnant quelques détails sur les procédés de fabrication du fer Armco et sur ses propriétés.

Ce métal, qui n'est autre qu'un acier extra pur contenant moins de 0,02 % de C, présente la particularité de ne pouvoir être laminé ou forgé sans criques entre 850 et 990° . Il possède dans cette région une fragilité extraordinaire rendant tout travail impossible.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les recherches qui sont résumées dans la présente étude ont eu pour but de déterminer les propriétés mécaniques des aciers en fonction de leur teneur en Carbone et pour toutes les températures comprises entre la température ordinaire et la fusion commençante.

Métaux utilisés.

Nous avons opéré sur cinq nuances d'acier Martin, dont les analyses sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Marque	C	Mn	Si	P	S
29	0,15	0,46	0,06	0,014	0,034
61	0,44	0,63	0,15	0,005	0,020
27	0,55	0,70	0,52	0,014	0,023
45	0,92	0,44	0,24	0,019	0,027
37	1,23	0,35	0,25	0,014	0,025

Barreaux

Il a été prélevé de chacune des coulées choisies deux lingots carrés de 320 mm. de côté sur 1 m. de hauteur, l'un d'eux devant fournir les barreaux non corroyés, tandis que l'autre fut laminé.

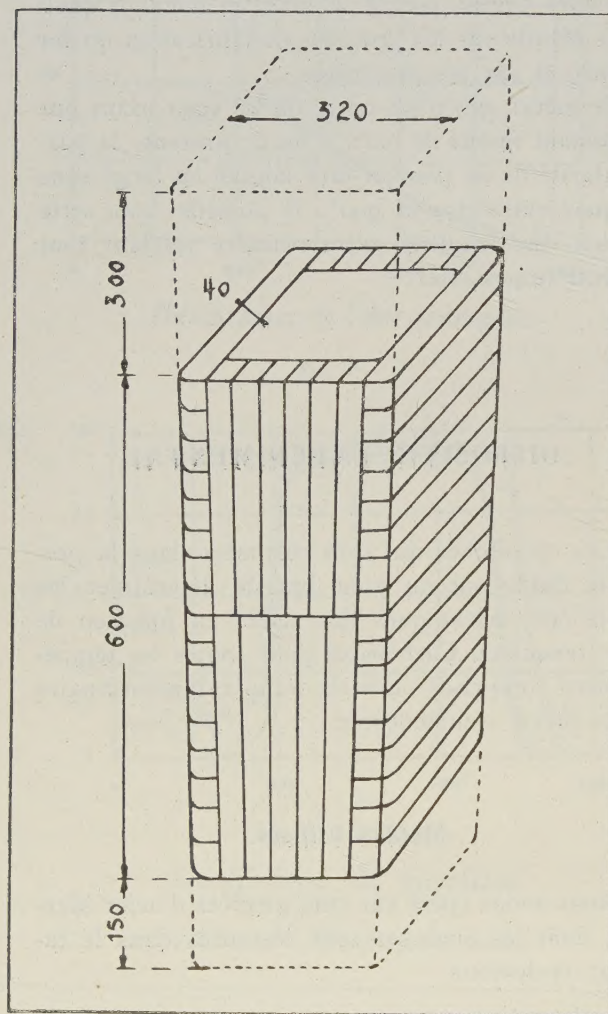


Fig. 6. — Mode de prélèvement des barreaux dans le lingot.

Barreaux découpés dans le lingot. — Les éprouvettes furent prélevées par sciage à froid dans le lingot refroidi à l'air et n'ayant subi aucun traitement thermique.

Afin d'être sûr d'avoir un métal sain, exempt de retassure et capable de fournir des barreaux

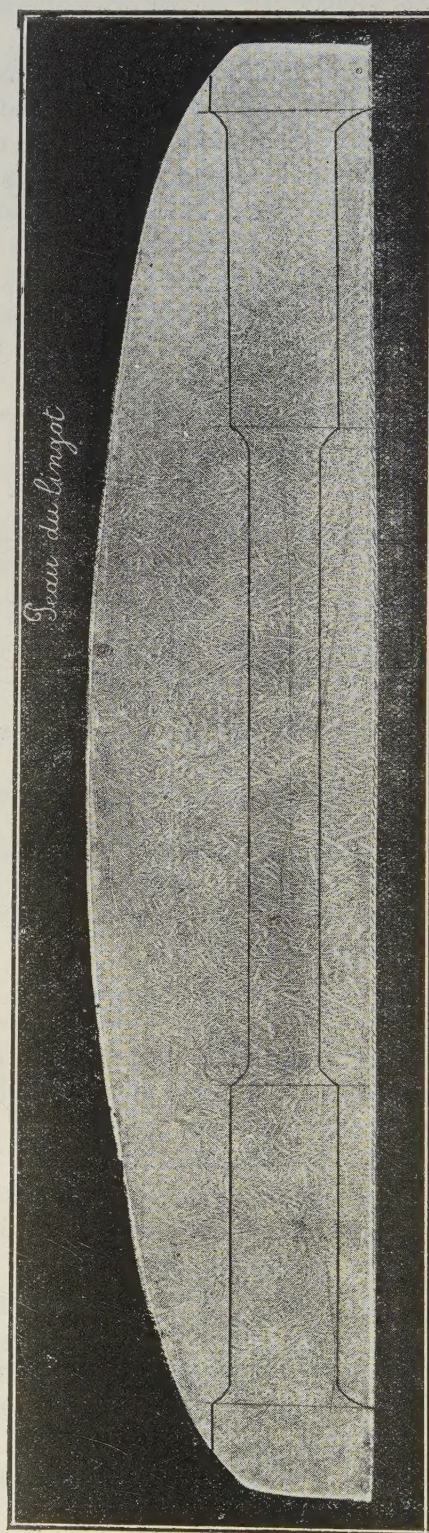


Fig. 7. — Fragment de lingot poli et attaqué au réactif au cuivre montrant l'emplacement du barreau.

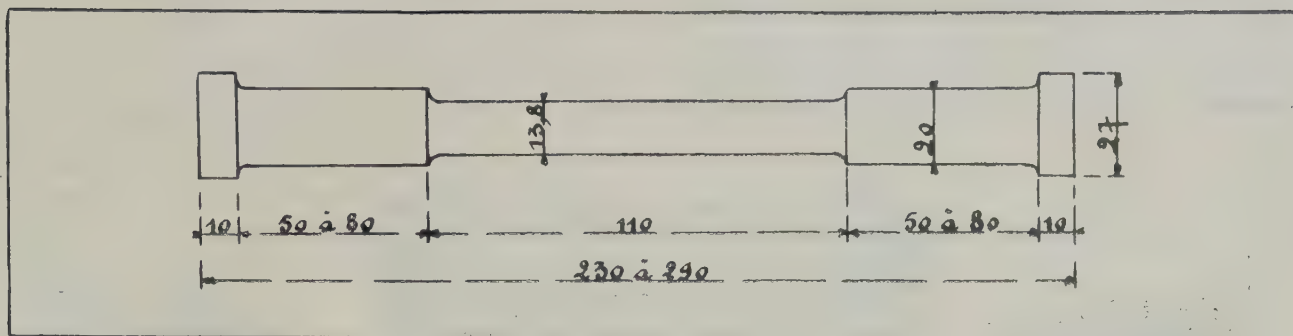


Fig. 8 Barreau de traction : Type normal.

identiques au point de vue cristallin, on a commencé, après avoir éliminé 30 % en tête et 15 % en pied du lingot, par découper des tranches verticales A, B, C, D parallèles aux faces, et de 40 mm. d'épaisseur (fig. 6). Ces plaquettes ont été ensuite sciées en morceaux de 30 mm. d'épaisseur dans lesquels les barreaux ont été tournés. Le centrage sur le tour a été effectué de telle sorte que la section dans laquelle se produit la rupture ait son centre à 30 mm. de la paroi du lingot initial (fig. 7).

Il résulte du mode de découpage adopté que les barreaux ont leur grand axe soit parallèle, soit perpendiculaire à l'axe du lingot. Des essais comparatifs ont montré que les propriétés mécaniques sont les mêmes dans les deux cas.

Barreaux laminés. — Le lingot destiné à fournir les barreaux laminés fut d'abord transformé en billette de 105 mm. de côté, puis, après refroidissement, réchauffé à nouveau pour être laminé en ronds de 27 mm. de diamètre.

Dimensions des barreaux. — La section de rupture adoptée est celle de 150 mm², soit un diamètre de 13,8 mm. Le croquis ci-joint (fig. 8) donne les dimensions des barreaux. Ils ont été obtenus par tournage à 14 mm. et rectification à la meule sous un abondant courant d'eau afin d'éviter tout échauffement.

Dans certains cas, nous avons été amenés à utiliser des barreaux à rupture amorcée. Le barreau a alors 16 mm. de diamètre avec une partie centrale amenée à 13,8 mm. sur une longueur de 5 mm. raccordée par des congés (fig. 9).

Barreaux « traités ». — Le traitement a consisté pour toutes les séries en un chauffage à 925° à partir du four froid (durée 1,30 h.). La température de traitement une fois atteinte est maintenue constante 10 minutes afin d'assurer l'égénéralisation de la température du centre et de la surface. Ce recuit est suivi d'un refroidissement à l'air calme. Il a été effectué sur des barreaux ébauchés à 16 mm. de diamètre, la mise aux dimensions définitives se faisant après traitement.

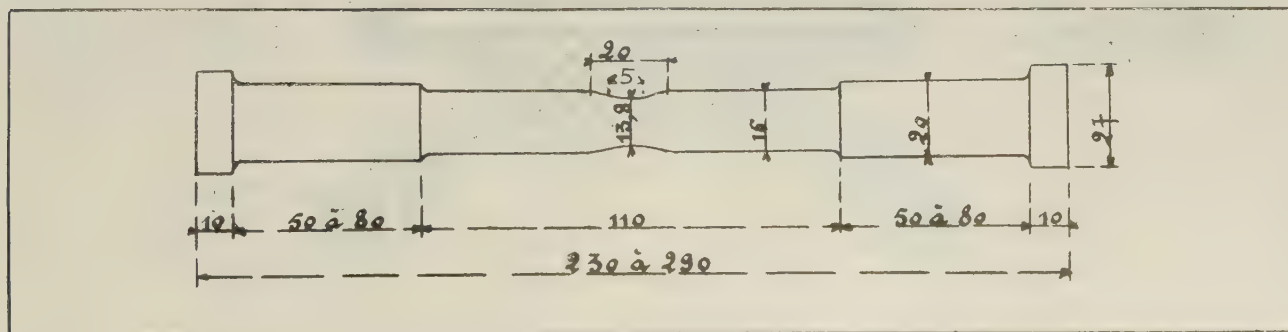


Fig. 9. — Barreau de traction : Type à amorce de rupture.

DISPOSITIFS DE CHAUFFAGE

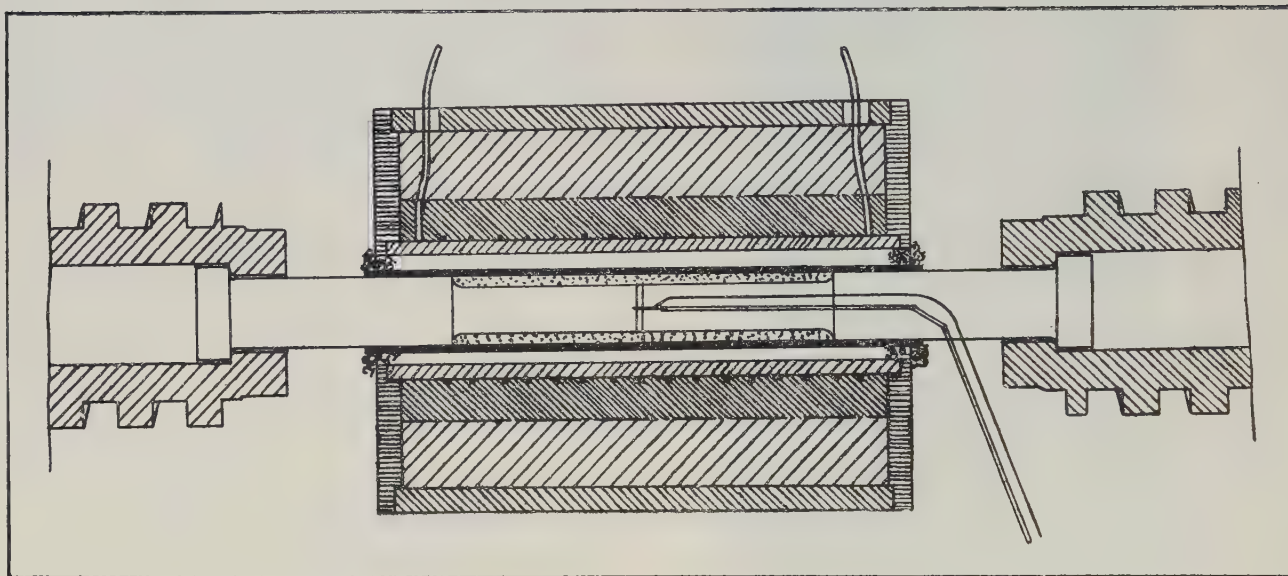


Fig. 10. — Coupe du four à résistance de platine et montage du barreau.

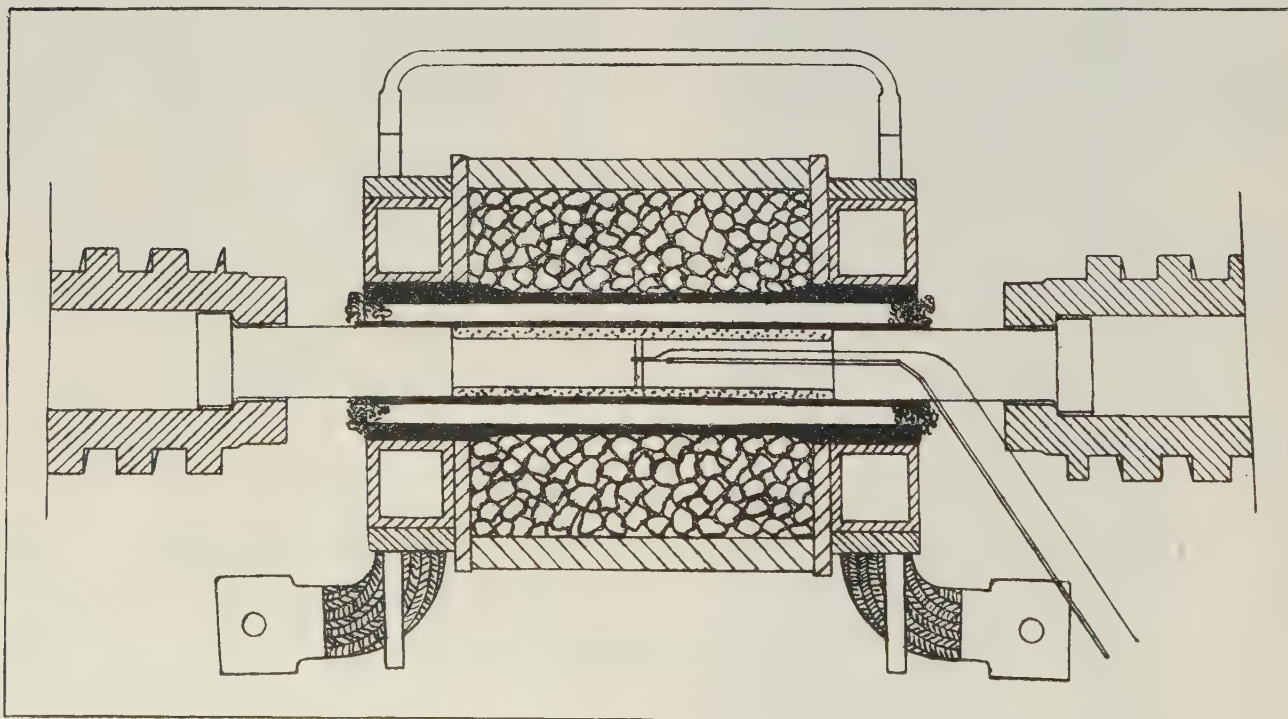


Fig. 11. — Coupe du four à résistance de charbon.

Conduite des Essais.

Les essais ont été effectués sur une machine Falcot de 50 t. à tarage par poids. La lecture des charges se faisait sur un manomètre à mercure permettant de lire à 25 kg. près, soit pour des barreaux de 150 mm² de section, à environ 200 gr. par mm² près. Cette erreur était donc inférieure à celles provenant de l'irrégularité des barreaux, etc.

Dans ce type de machine, l'essai se fait à vitesse d'allongement constante. Nous avons toujours opéré avec une vitesse d'allongement de 12 mm. par minute. Le mouvement est commandé par un moteur électrique qui assure un fonctionnement sans chocs ni à-coups.

Dispositifs de chauffage. — Nous avons utilisé deux dispositifs de chauffage différents, suivant que les mesures étaient effectuées au-dessous ou au-dessus de 1250°.

Mesures au-dessous de 1250°. — Le barreau était placé dans l'axe d'un four à tube à résistance de platine de 160 mm. de longueur et de 32 mm. de diamètre intérieur (fig. 10). Le métal était protégé de l'oxydation en plaçant la partie de 13,8 mm. de diamètre dans une enveloppe en tôle s'appuyant sur la région renflée. L'intervalle était garni soit de limaille d'acier, soit de charbon de bois. Des essais comparatifs nous ont montré que les deux modes de protection donnaient des résultats identiques au point de vue des propriétés mécaniques à chaud.

Mesures au-dessus de 1250°. — Pour les essais à température très élevée nous avons remplacé le four à résistance de platine par un autre four identique comme dimension, mais dans lequel la partie chauffante était constituée par un tube de charbon parcouru par un courant de l'ordre de 400 ampères sous une douzaine de volts (fig. 11). Des anneaux refroidis par une circulation d'eau protégeaient les têtes des éprouvettes contre tout

échauffement exagéré. Dans ce cas, le barreau a toujours été placé dans la limaille d'acier doux, afin d'éviter la formation de fonte par cémentation de l'enveloppe protectrice en tôle.

Mesure des températures. — La soudure chaude d'un couple Le Chatelier au platine — platine Rhodié — était fixé à l'aide d'un fil de nichrome de $\frac{1}{2}$ mm. de diamètre au contact de la partie centrale du barreau. Les forces électromotrices étaient lues sur un millivoltmètre permettant de déterminer les températures du couple, et par suite le réglage du four à 2 degrés près. Les couples ont été gradués en prenant comme points fixes :

Ebullition de la naphthaline.....	210°
— du soufre	445°
Fusion du cuivre	1088°

et en calculant d'après ces valeurs les coefficients de la formule

$$V = a + b t + c t^2$$

Les couples ont toujours été réétalonnés deux fois par semaine; nous n'avons jamais eu d'écarts supérieurs à 0,05 mv. pour le point de 1088°.

Echauffement des barreaux. — Le réglage du chauffage a toujours été fait de façon à atteindre la température désirée à une vitesse de 20° par minute. On chauffait d'abord à une température de 10° supérieure à celle que l'on voulait atteindre pour refroidir ensuite de façon à ramener en 5 minutes à la température fixée. Ce mode opératoire permettait d'égaler la température dans toutes les sections de rupture du barreau.

Nous nous sommes attaché à suivre un mode opératoire aussi systématisé que possible. De cette façon les erreurs dues aux causes telles que le chauffage inégal, l'écart entre la température du couple et celle du centre du barreau, etc., sont rendues systématiques. Les résultats obtenus peuvent en être légèrement décalés quant à leur valeur absolue, mais ils n'en sont pas moins comparables entre eux.



Fig 12. — Machine de traction Falcot disposée pour une expérience.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Acier à 0,15 % de C.

1. *Métal brut de coulée.* — La charge de rupture à froid est de 34 kg. par mm². Elle reste sensiblement constante jusque vers 500°, en présentant cependant un léger maximum vers 250°. Il y a ensuite diminution régulière jusqu'à 750°,

disposition du four, le milieu du barreau se trouvait plus chaud que les extrémités, cette anomalie semblait indiquer que la charge de rupture passait par un minimum et recroissait ensuite. On substitua alors aux barreaux employés jusqu'ici, le type à amincissement localisé sur 5 mm. de façon à provoquer la rupture dans la région dont on mesurait la température. Effectivement, un essai fait à 775° donna une charge de 6 kg. par

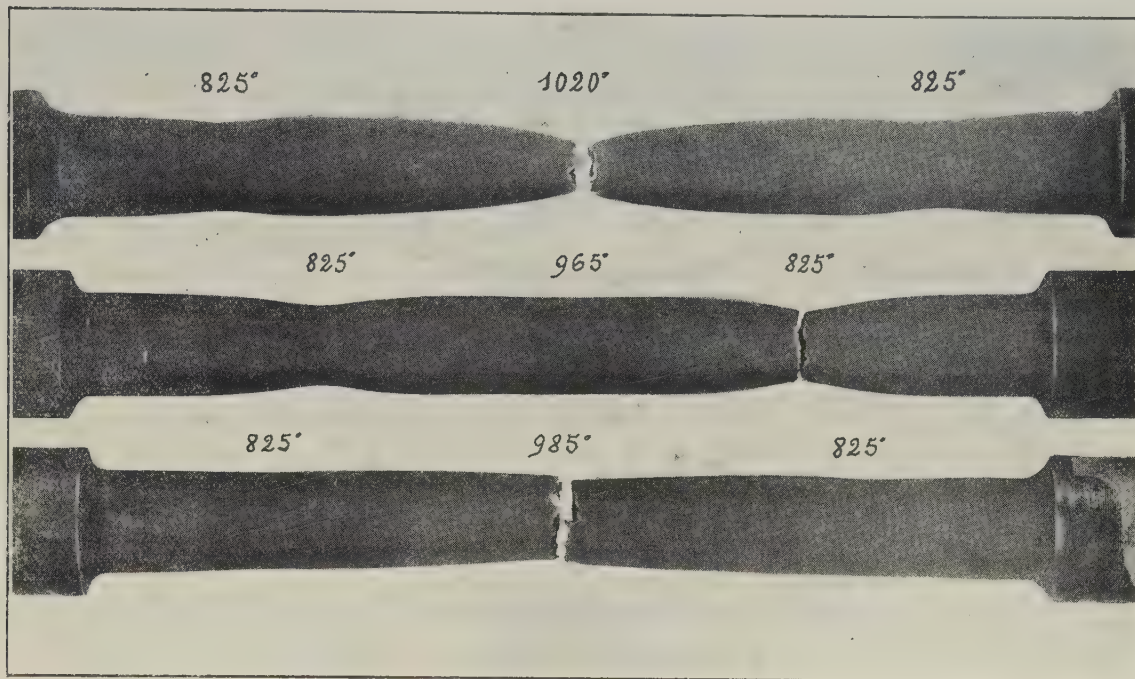


Fig. 13. — Acier à 0,15 % de C, laminé.
Aspect des barreaux cassés dans la région du minimum de charge de rupture

température pour laquelle la rupture se produit pour 9 kg.

A partir de ce point la courbe présente une légère d'scontinuité. Elle redescend ensuite mais de plus en plus lentement, jusqu'à 825°. Le premier échantillon essayé au-dessus de cette température, soit à 900°, ne cassa pas au milieu, de plus, il présentait deux strictions symétriques par rapport au centre, la rupture s'étant effectuée à l'une d'elles (fig. 13). Comme, par suite de la

mm². Cette courbe en U se prolonge jusqu'à 870°, température à partir de laquelle la charge recommence à décroître.

La striction à 16° est de 35 %. Elle présente à 200° et 600° des maxima suivis de paliers légèrement inclinés et atteint 48 % vers 750°. A ce moment, se produit une discontinuité : elle augmente de 54 %. Elle redescend ensuite rapidement jusqu'à 14 % à 96°, puis augmente à nouveau et atteint 100 % à 1200°.

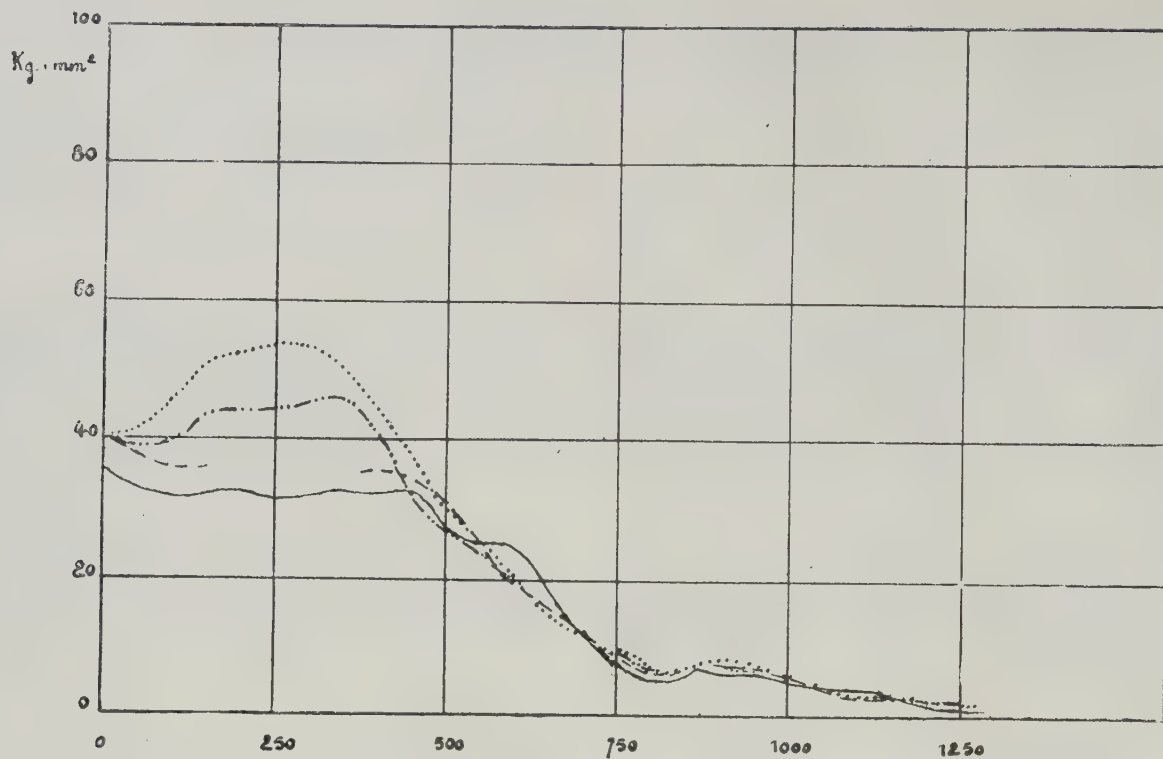


Fig. 14. Acier à 0,15 % de C. Charge de rupture.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - . Métal laminé traité.

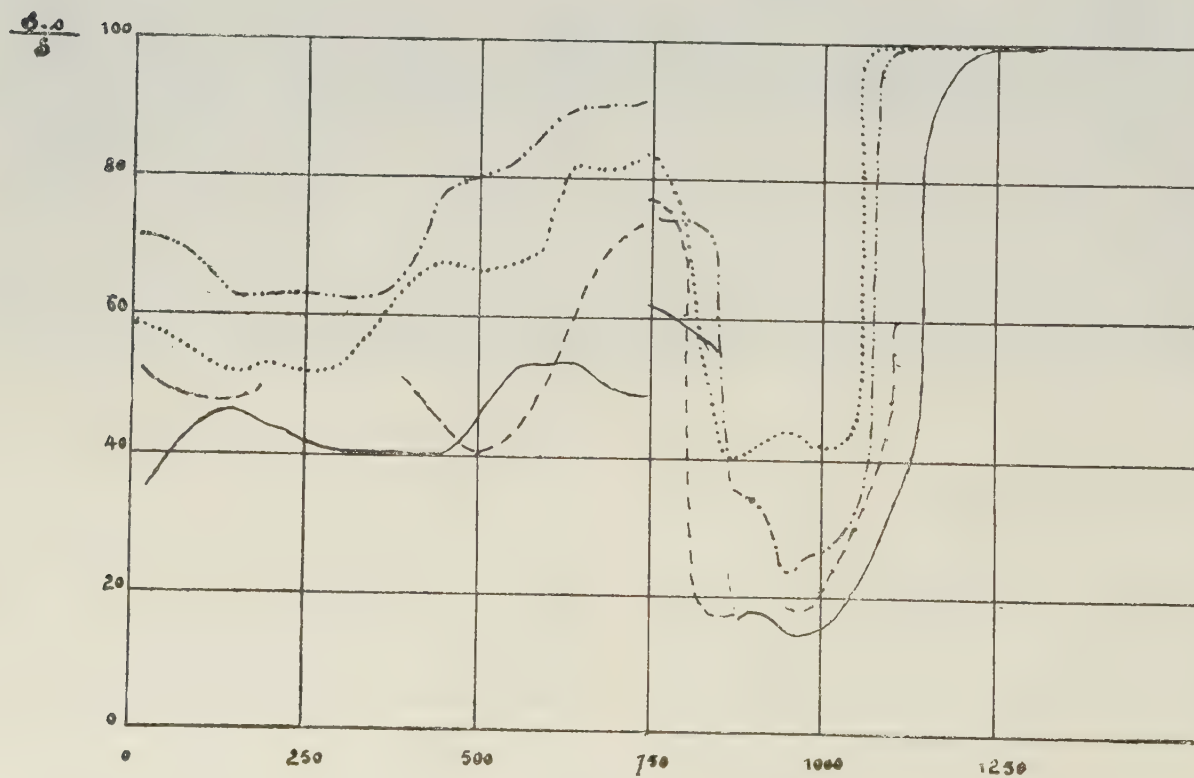


Fig. 15. Acier à 0,15 % de C. Striction.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - . Métal laminé traité.

SÉRIE 29.

MÉTAL BRUT

Acier à 0,15 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
29 A 10	à froid	34,1	33,1	29 B 11	750° - 775°	9,15	48,6
D 2	125°	31	45,4	A 4	760°	6,7	62
B 8	154°	30,8	45,4	B 2	825°	5,3	57
C 1	185°	32,5	43,5	A 12	850°	5,35	35,6
Bx 6	260°	27,5	41	B 10	885°	6,65	16,7
B 7	315°	32	38,8	A 8	890°	5	
D 7	335°	32,5	41	A 3	905°	6,35	17,9
B 9	355°	32,5	39,9	A 5	930°	5,3	
B 3	440°	33	39,9	A 6	960°	5,35	
B 15	500°	27	45	B 12	965°	6,45	14
B 14	550°	24,5	52,7	D 4	1010°	5	16,7
B 5	600°	25	53	A 9	1140°	4	47,5
B 4	650°	18,5	52,7	A 11	1210°	1,9	99,3
D 6	675°	14,5	50	A 2	1260°	1,7	99,6

SÉRIE 29.

MÉTAL TRAITÉ

Acier à 0,15 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
29 C 2	à froid	39,5	52	29 Ax 6	805°	6,7	50
Ax 2	100°	35,8	47,5	Ax 5	800°	6,3	60
Ax 3	415°	35,5	48	D 5	925°	7,5	18,5
C 3	500°	31,4	40	Bx 3	950°	5,7	
Ax 4	580°	20	48	Bx 2	1000°	5,8	20,5
C 7	670°	15	67	Ax 1	1100°	3	48
D 3	750°	9	77				

LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

Ces variations des deux grandeurs mesurables, charge de rupture et striction, sont accompagnées, comme nous le verrons plus loin, de variations dans l'aspect des cassures.

II. *Métal coulé traité.* — Un recuit à 825° suivi d'un refroidissement à l'air modifie légèrement les propriétés mécaniques du métal, tout en conservant la même allure au phénomène. L'examen des courbes montre que la charge de rupture à froid est augmentée de 6 kg. par mm², cette différence allant en s'atténuant au fur et à mesure que la température s'élève.

La striction est également augmentée dans de notables proportions. Cette amélioration est surtout entre 600° et 750°.

III. *Métal laminé.* — Le corroyage particulièrement élevé qu'a subi le métal au laminage (réduction de surface de 100 à 1) n'a que peu d'influence sur la charge de rupture et les courbes conservent toujours la même allure. La striction au contraire est augmentée de façon très sensible; elle atteint 100 % près de 150° plus bas que pour le métal brut de coulée, et reste constante jusqu'à 1400°; elle tombe alors brusquement à zéro en même temps que la charge de rupture.

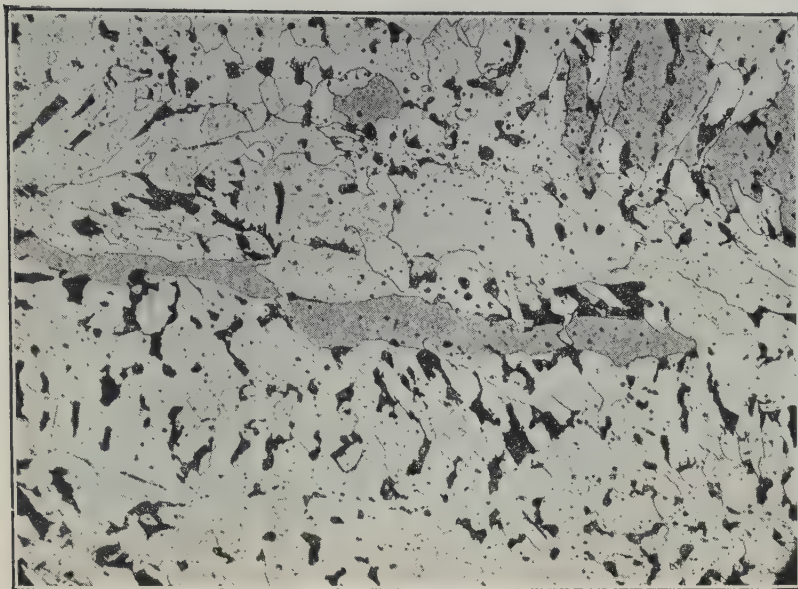
IV. *Métal laminé traité.* — L'influence du recuit est surtout sensible au-dessous de 750°. Dans cette région, la striction après être passée de 71 % à 62 % à 150°-350° (fragilité du bleu) se relève ensuite et atteint 91 % à 750°.

SÉRIE 29.

MÉTAL LAMINÉ

Acier à 0,15 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
29 L 10	à froid	39,3	58,4	29 8	800°	6,5	75
L 18	150°	50,8	52	A 22	825°	5,68	56,6
A 3	200°	52,1	53,7	A 2	850°	6,68	46,5
A 28	250°	53,1	51,8	19	875°	7,2	40
A 8	300°	53,1	52,7	A 29	900°	7,85	41,6
A 7	375°	46,4	61,2	L 17	950°	7	44
3	450°	37	67,3	A 27	985°	5	42,2
A 23	500°	26,7	66,4	A 36	1000°	5,18	42,2
1	550°	23,7	67,6	11	1025°	4,3	41,6
A 13	600°	20,7	69,7	A 24	1050°	4,2	46,5
25	605°	18,8	73,5	24	1075°	2	99,9
A 25	625°	16	77,1	12	1155°	2,6	99,9
2	650°	12,3	82,4	23	1400°	1	100
A 37	665°	13,25	80,5	B 8	1415°	0	0
A 11	700°	11	81	B 5	1430°	0	0
4	750°	8,4	83,3	B 6	1450°	0	0
A 10	775°	8,6	80,5				



⇒ → Vers le grand axe du lingot.

Fig. 16. — Acier à 0,15 % de C. Structure du métal brut.
Coupe perpendiculaire à l'axe du barreau.
($\times 37$. Attaque AzO^{H} alcoolique).

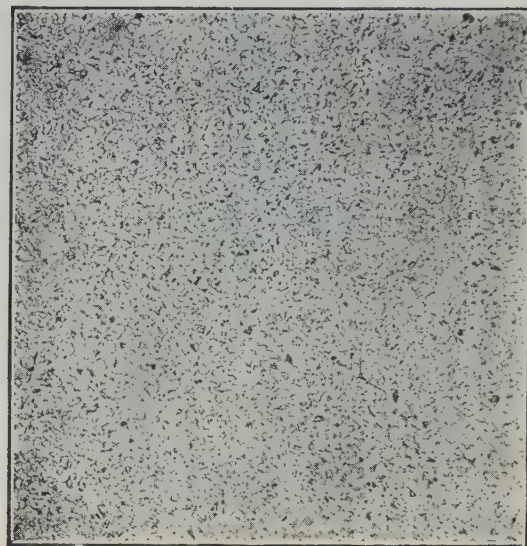


Fig. 17. — Acier à 0,15 % de C.

Structure du métal traité

($\times 37$).

SÉRIE 29.

MÉTAL LAMINÉ TRAITÉ

Acier à 0,15 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
29 L 13	à froid	39,5	71,3	29 L A 33	850°	5,7	62,9
A 19	100°	39,4	68	A 39	850°	6	71,3
22	150°	43,5	62,9	20	875°	7	36
A 21	250°	44,4	62,9	A 32	925°	7,3	30,6
A 15	350°	45,5	62,5	A 1	950°	5,61	23,8
5	450°	30	77,8	A 30	975°	5,0	25,8
6	550°	23,2	82	A 17	1000°	5,5	26,4
A 4	600°	19	87	15	1025°	4,5	29
A 31	690°	11,35	90,5	A 18	1075°	3,7	48,7
A 9	725°	8,7	90,7	16	1150°	2,35	99,8
9	750°	8,35	91,3	A 16	1250°	1,5	99,9
A 20	775°	7,7	73,5				

SÉRIE 6I
MÉTAL BRUT
Acier à 0,44 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
61 D 4	à froid	53	12,2	61 D 1	700°	16,2	16
C 3	100°	45,5	12,7	B 1	750°	11,7	17,3
C 1	200°	47	12,7	C 1A	775°	10	30,2
A 9	250°	48,8	10	C 12	775°	11	29,5
C 9	300°	48,8	10	D 5	800°	9	26
A 13	400°	44,5	10,7	C 8	850°	10,2	30
B 4	450°	39,4	18	C 7	900°	8,6	29
A 17	500°	37,1	17	A 1	950°	6,3	26,5
B 9	550°	28,9	18	D 9	1000°	4,85	26
C 15	600°	24,1	16,7	A 11	1050°	3,8	34
A 8	600°	25,8	12,7	B 6	1080°	3,3	47,5
C 11	625°	23	15	B 2	1125°	2,5	98,7
B 3	630°	22,3	15,5	C 14	1250°	0,9	100
				B 8	1350°	0,7	100
				B 5	1375°	0,7	100
				D 7	1400°	0	0

SÉRIE 6I
MÉTAL TRAITÉ
Acier à 0,44 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
61 C 18	à froid	58,5	15,5	61 D 6	775°	11,4	60
C 13	125°	53,9	20,1	A 19	800°	11,2	30,5
A 5	250°	57,1	17	A 18	850°	11,2	33
A 12	325°	60,2	18	A 4	900°	8,35	42
A 6	425°	52,1	27,5	C 5	950°	6,2	44,3
A 3	500°	37,4	40	A 16	1000°	4,5	38,5
C 17	575°	31,1	46,5	A 14	1050°	3,3	32,2
A 2	625°	22,1	46	D 8	1075°	3	49,6
A 10	700°	16,1	50	A 20	1150°	2	99,2
C 16	750°	11	69				

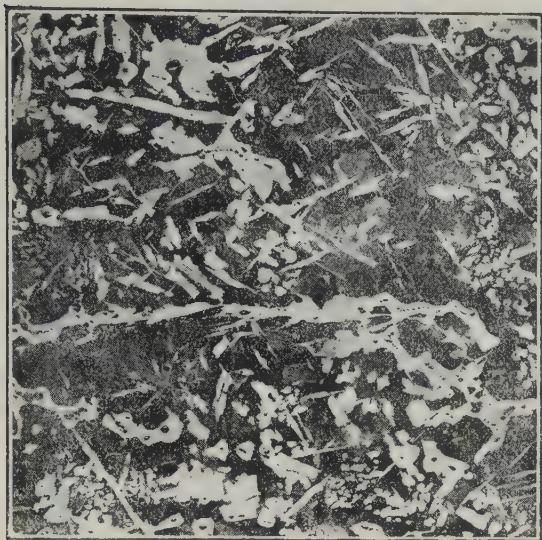


Fig. 20.
Coupe perpendiculaire au grand axe du barreau.
Acier à 0,44 % de C. Métal brut. $\times 37$.

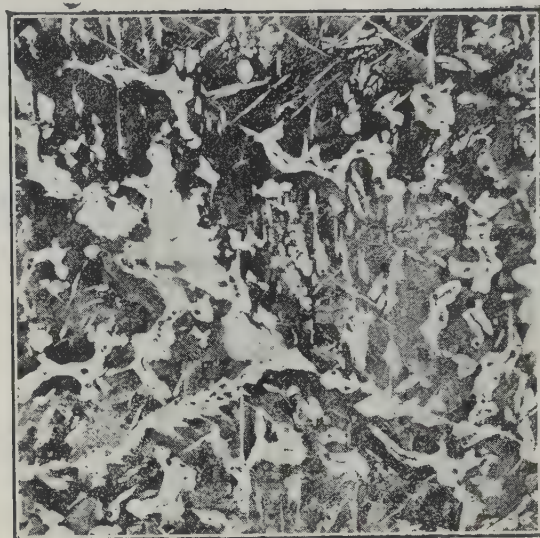


Fig. 21.
Coupe parallèle au grand axe du barreau.
Acier à 0,44 % de C. Métal brut. $\times 37$. Attaque AzO^3H alcoolique.

Acier à 0,44 % de C.

Le métal à 0,44 de C. se comporte aux valeurs absolues près, de façon peu différente de l'acier extra-doux. Jusque vers 750° , le métal brut de coulée casse presque sans striction. Le recuit améliore la striction aux basses températures, la faisant passer de 12 à 15-20 %, mais son influence est surtout sensible à partir de 450° , température à laquelle la malléabilité du métal commence à croître, pour atteindre 70 % à 750° .

Le laminage augmente encore cette ductilité et, après un minimum vers 300° , la striction croît rapidement entre 350° et 400° , plus lentement ensuite pour atteindre 65 % à 750° pour le métal brut de laminage et 85 % pour le métal laminé et traité.

La charge de rupture diminue d'abord légèrement lorsque la température s'élève, passe par un minimum à 120° - 150° , puis remonte jusqu'à 300° et décroît ensuite régulièrement jusqu'à 750° .

Les courbes correspondant aux charges de rupture aux divers états suivent une marche tout à fait parallèle.

A 750° , les deux séries de courbes présentent

une discontinuité. La striction subit une élévation brusque suivie d'une descente. Elle se relève ensuite et, après une nouvelle descente vers 1.000° , elle remonte rapidement pour atteindre 100 % à 1100° .

La charge de rupture présente un minimum vers 610° , remonte ensuite jusqu'à 850° et redescend régulièrement jusqu'à la fusion.

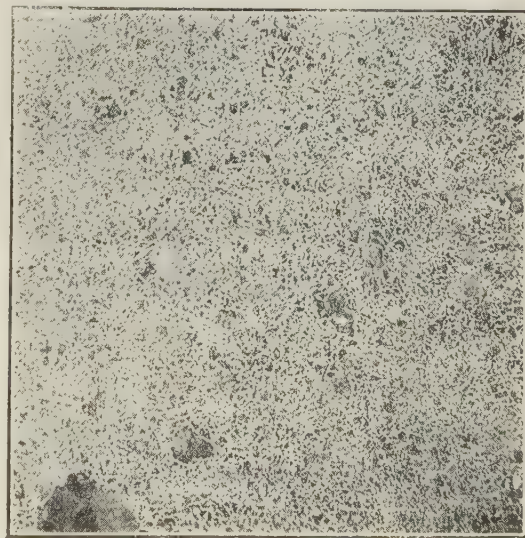


Fig. 22 — Acier à 0,44 % de C. Métal traité.
 $\times 37$. Attaque AzO^3H alcoolique.

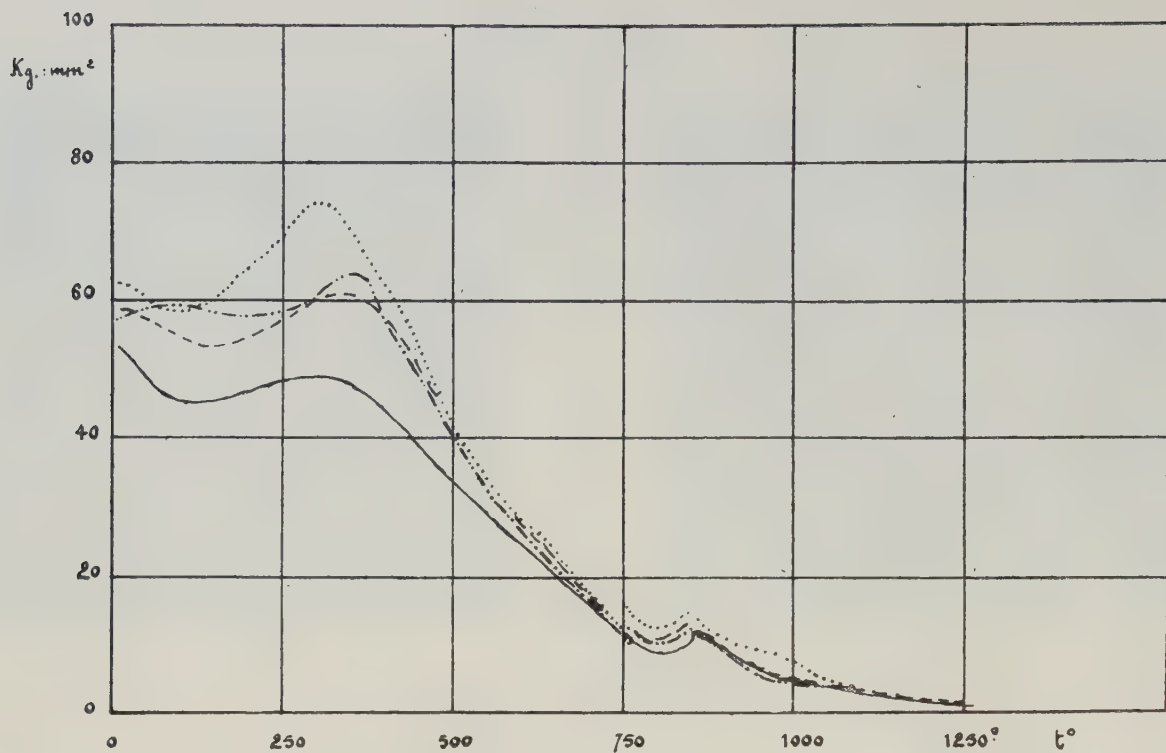


Fig. 18.
Acier à 0,44 % de C Charge de rupture.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - . Métal laminé traité.

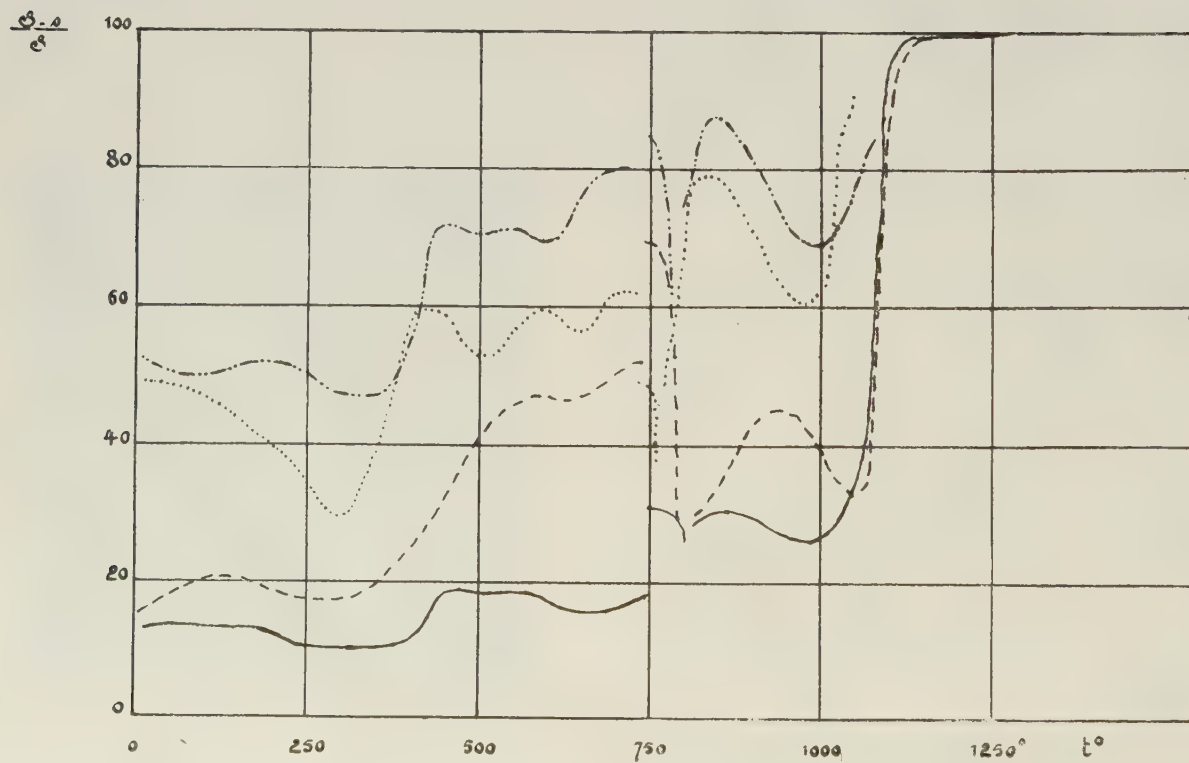


Fig. 19.
Acier à 0,44 % de C. Striction.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - . Métal laminé traité.

SÉRIE 61

MÉTAL LAMINÉ

Acier à 0,44 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
61 L 1	à froid	62,4	49	61 L A 3	725°	14,8	48,6
20	180°	63,3	41,1	29	750°	15,6	37
23	250°	68,7	35,3	A 7	775°	13,4	52,7
A 5	300°	74,1	29,4	22	800°	12,5	65,6
21	350°	69,3	37,7	A 9	825°	13,0	78,5
24	425°	58,5	59,3	28	875°	11,35	75,5
3	500°	42,1	52,7	X 34	975°	7,0	60,3
4	600°	27,8	59,3	A 2	1000°	5,8	61,7
X 25	650°	24,7	55,6	X 26	1025°	5,2	74,5
6	700°	15,7	61,7	8	1025°	5,1	81
A 1	725°	14,8	48,6	X 6	1350°	0,6	100

SÉRIE 61

METAL LAMINÉ TRAITÉ

Acier à 0,44 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
61 L 27	à froid	59,3	51,8	61 19	750°	11,2	84,5
31	100°	59,8	49,6	9	775°	11,7	66,5
12	175°	57,6	52	A 10	800°	10,5	75
10	300°	60,4	47	A 14	850°	11,36	87,4
32	375°	63	47,5	A 13	875°	10,0	84,2
13	450°	47,5	72	A 12	912°	8,2	78,5
30	500°	39,7	69,7	16	950°	5,6	71,8
11	550°	31,2	70,8	A 8	1000°	5,0	68,9
33	600°	30,5	68,9	A 11	1050°	4,2	77,9
14	650°	20,6	76				
15	700°	15,6	80				

LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

SÉRIE 27.

MÉTAL BRUT

Acier à 0,55 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
27 B 11	à froid	62,2	1,5	27 B 10	875°	11,7	46,5
B 2	100°	60	3	A 12	900°	9,36	43,3
B 13	250° — 300°	60	4	B 1	910°	9,7	40
A 1	300°	65	4,4	A 4	930°	11,9	43
B 4	360°	60	4,5	A 2	935°	8,0	40,5
A 10	495°	53,5	7,3	A 6	945°	7,75	45,5
Ax 7	560°	51,7	10	A 3	1025°	4,85	88
A 7	615°	44,1	8,2	C 2	1125°	2,6	98,5
B 3	725°	31,4	4,5	Bx 3	1190°	2,6	98,4
A 8	760°	22,7	5,8	A 5	1225°	1,67	100
B 15	785°	13,2	5,8	C 7	1370°	1,3	100
B 7	820°	13,2	53,7	D 1	1440°	0	0
A 9	835°	14	45				

SÉRIE 27.

MÉTAL TRAITÉ

Acier à 0,55 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
C 4	à froid	92,3	24,5	27 Bx 1	600°	45	40,8
Ax 2	90°	81	18	C 3	650°	37,1	42,8
Ax 3	200°	84,9	16	C 6	695°	24,7	44,3
C 5	300°	93,9	16,2	Ax 1	850°	12,2	83,3
Bx 7	325°	88	11,5	D 3	900°	8	80
Ax 4	400°	73,8	22,1	Bx 5	1000°	5,7	88,6
C 1	500°	64,5	44				

Acier à 0,55 % de C.

Les courbes représentant les variations des propriétés mécaniques de l'acier à 0,55 de C. se divisent au-dessous de 775-800° en deux groupes : d'une part le métal brut de coulée, puis le métal traité ou laminé.

Le métal brut de coulée casse au-dessous de 800° avec une assez faible striction. A ce moment, il y a amélioration brusque, la diminution de section passant de 7 à 45 %; elle reste au voisinage

jusqu'à 775°. A ce moment se produit une discontinuité. La diminution de section s'élite brusquement pour redevenir jusqu'à 900°. Elle augmente de nouveau et atteint 99 % à 980°.

La charge de rupture, après un léger minimum à 175°, s'élève jusqu'à 310°. Après ce maximum, elle redescend régulièrement jusqu'à 800°. Il se produit alors une légère discontinuité, suivie de quelques ondulations et la décroissance régulière recommence au-dessus de 940°.

L'examen micrographique permet de compren-

Fig. 23

Acier à 0,55 %
de C
brut de coulée.



Aspect
des
cassures.

de cette valeur jusque vers 1000° et atteint 99 % à 1125°. Vers 1400°, elle tombe brusquement à zéro. La charge de rupture partant de 66 kg. : mm² s'abaisse d'abord pour remonter peu après jusqu'à 65 kg. à 360°. Elle redescend ensuite lentement, puis plus rapidement au-dessus de 550°. A 800°, elle présente une discontinuité. La cassure change d'aspect à ce moment : alors qu'au-dessous de 800° la rupture se produit par décollement de grains de perlite, on a au-dessus une structure à nerf (fig. 23). On trouve alors une branche en U s'étendant jusqu'à 940°. A partir de cette température, elle redescend à nouveau régulièrement jusque vers 1400°, où elle passe brusquement de 1,3 kg. : mm² à 0.

Pour le deuxième groupe, la striction reste voisine de 25-30 % jusqu'à 375°; elle monte alors assez rapidement, présente un léger palier entre 400° et 500°, redescend jusqu'à un minimum pour 600° et se prolonge avec quelques ondulations

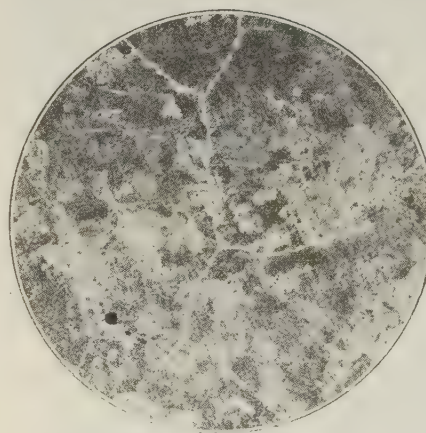


Fig. 25. — Acier à 0,55 % de C. Structure du métal brut.
Coupe par un plan perpendiculaire à l'axe du barreau.

dre les causes de cette différence entre le métal brut de coulée et le même métal traité. Il montre en effet (fig. 24-28) qu'à l'état brut de coulée la structure est presque exclusivement perlitique,

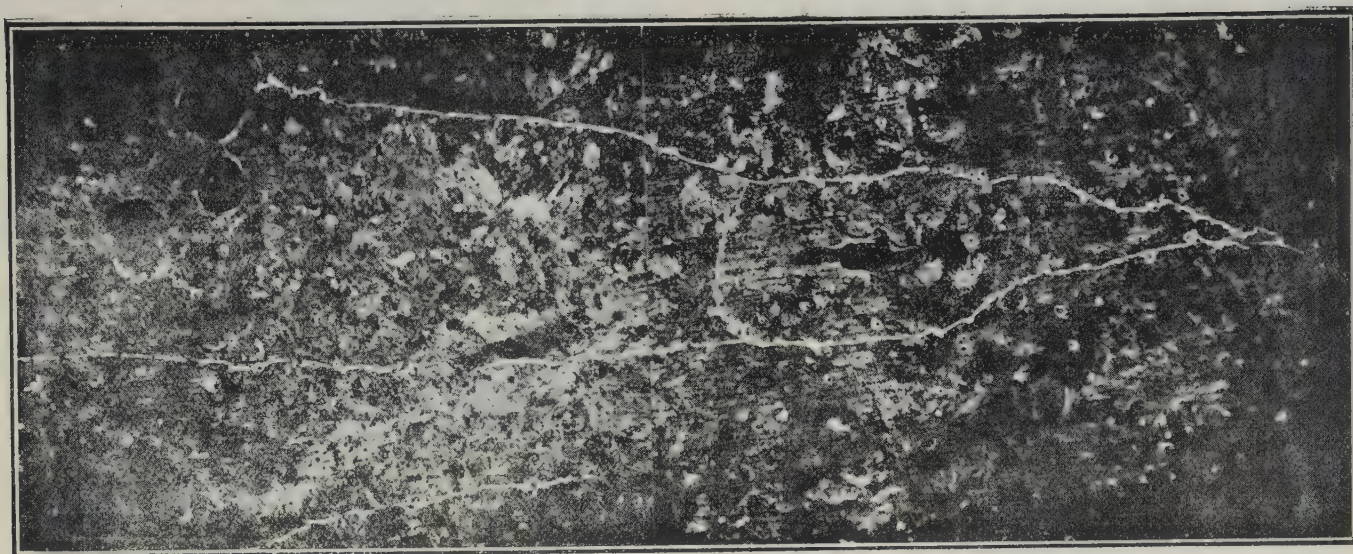
SÉRIE 27.
MÉTAL LAMINÉ
Acier à 0,55 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
27 L 3	à froid	85,3	23	27 24	700°	30	47
A 1	150°	87,6	23,9	21	745°	21,7	45
18	250°	87,3	20,6	A 6	775°	13,7	75
A 10	300°	102,6	28,5	A 2	800°	15,9	68,9
6	350°	95,5	31	5	815°	12,6	87,3
20	375°	77	52,7	A 3	825°	12,7	68,9
A 21	415°	77,5	56,6	A 11	850°	12,2	65,3
A 27	450°	71,6	56,6	A 22	875°	11,7	68,9
A 4	500°	62,1	48,6	A 9	900°	10	58,8
8	550°	50,4	42,2	A 24	925°	7,7	60,3
23	620°	41,1	38,5	A 7	950°	6,5	61,2
A 3	650°	33,2	46,7	22	1000°	4,3	98
				A 8	1100°	3,2	98,7

SÉRIE 27.
MÉTAL LAMINÉ TRAITÉ
Acier à 0,55 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
27 L 12	à froid	84,9	32,5	27 A 15	740°	17,5	53,7
17	200°	83	33,1	10	750°	17,3	48,6
11	250°	87,6	31,6	A 17	760°	14,2	73,5
A 20	325°	99,1	34,7	A 28	800°	14,2	76,4
13	350°	97,5	44,8	A 16	840°	13	77,8
A 18	400°	87,9	48	A 12	875°	11,5	77,8
16	435°	79	60	A 13	925°	6,7	76
A 14	500°	59,1	60,3	A 26	975°	6,54	80,5
7	550°	50,8	58,5	A 19	1000°	5	92,5
14	650°	34	59,3	15	1045°	4,35	99
9	700°	28,7	58,5				

Fig 24. — Acier à 0,55 % C. Structure du métal brut. $\times 37$. Attaque AzO^3H alcoolique



→ Vers le grand axe du lingot.

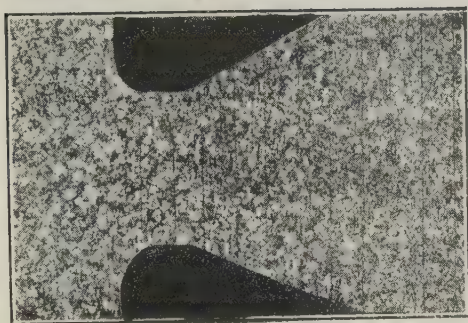


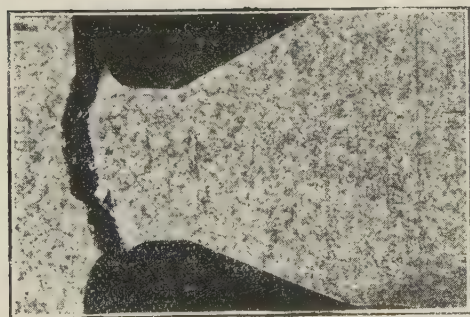
Fig. 26.

Avant cassure



Fig. 27.

Après cassure.



Attaque : AzO^3H alcoolique.



Attaque au cuivre.

Fig. 26 et 27. — Acier à 0,55 % C Mode de rupture du métal brut de coulée.

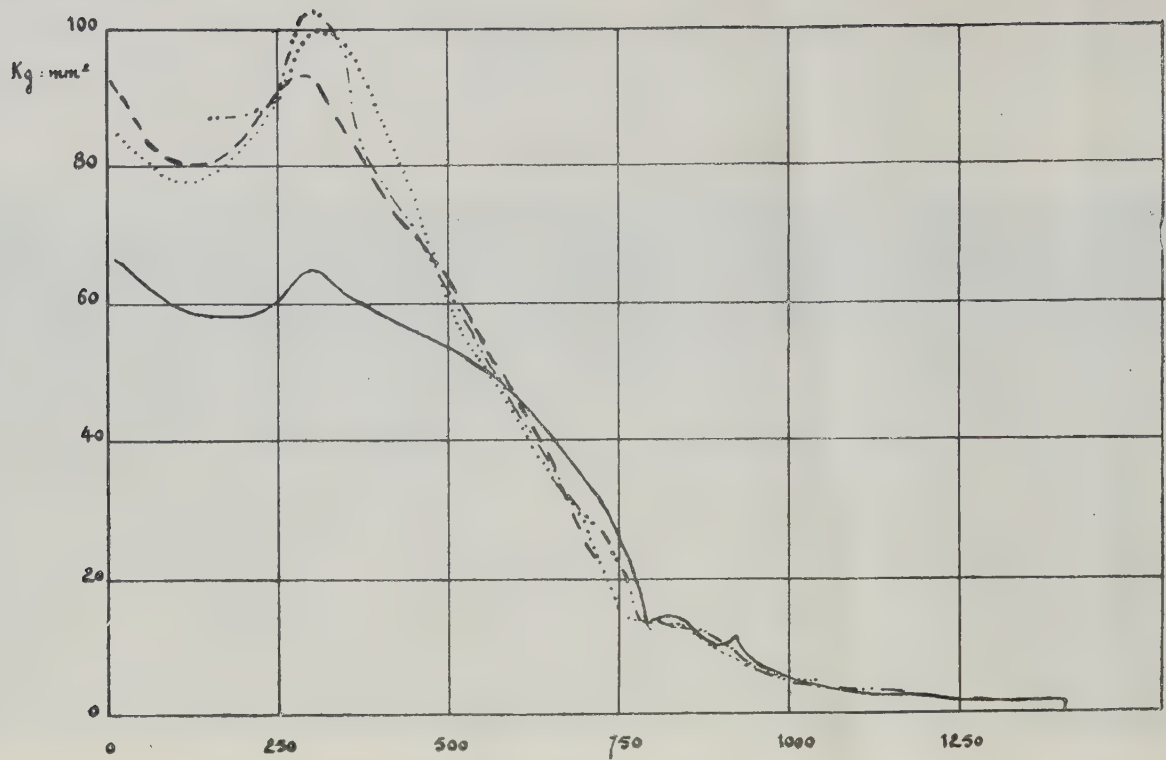


Fig. 29.
Acier à 0,55 % de C. Charge de rupture.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - Métal laminé traité.

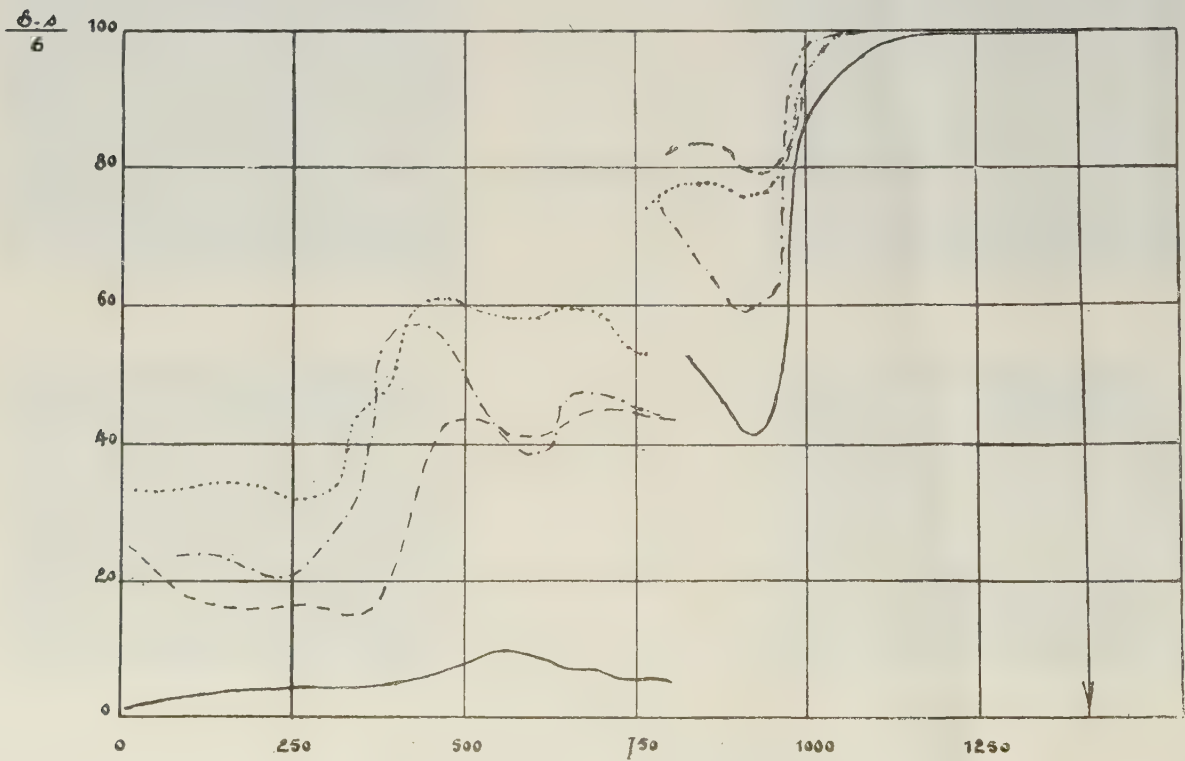


Fig. 30.
Acier à 0,55 % de C. Striction.

— Métal brut.
 - - Métal traité.
 . . . Métal laminé.
 - . - Métal laminé traité.

avec, dans les joints des cristallites, de minces filets de ferrite. On a donc une structure anormale pour laquelle la teneur apparente en carbone est voisine de celle correspondant à l'eutectique. La rupture, comme le montre les photos 26 et 27 représentant le même point d'une éprouvette avant et après rupture, se produit dans la ferrite des joints sans que les îlots de perlite soient sensiblement déformés. Comme ces joints sont très minces, leur déformation ne modifie pas sensiblement la

Acier à 0,91 % de C.

Cette composition correspond à celle de l'acier eutectoïde. Jusqu'à 450°, les éprouvettes découpées dans le lingot, qu'elles aient été ou non traitées, cassent par fragilité, la rupture se produisant entre les cristallites.

De 450° à 800°, la charge de rupture du métal brut de coulée passe de 70 à 9 kg. par cm², la striction s'élevant lentement de 4,5 à 8,6 % dans le même intervalle. A ce moment, la malléabilité s'élève brusquement pour atteindre 98 % à 850° et 100 % peu après. La charge de rupture décroît alors plus lentement pour atteindre 1,7 kg. : cm² à 1150°. La courbe représentative est donc formée de deux branches se coupant à 800°.

Le traitement n'élève que de façon insensible la charge de rupture; la striction, au contraire, est considérablement modifiée dans la région située au-dessous de 800°. Partant de 43 % à 400°, la courbe s'abaisse d'abord jusqu'à 33 % à 600°, pour remonter ensuite rapidement jusqu'à 99 % à 800°.

Les propriétés du métal laminé sont assez voisines, qu'il ait été ou non traité. La charge de rupture s'élève d'abord jusque vers 325°, où elle atteint 113 kg. : cm² pour le métal brut et 118 kg. : cm² pour le métal traité. Elle descend ensuite jusqu'à 800°, point pour lequel les diverses courbes se réunissent. Pour des températures plus élevées, les charges de rupture sont sensiblement indépendantes du corroyage ou du traitement du métal. Les deux courbes de striction se comportent également de même, celle du métal traité étant légèrement au-dessus de celle du métal brut de laminage. La température s'élevant, la striction décroît lentement de 14-16 % jusqu'à 10 % pour 325°. Elle monte ensuite presque verticalement, présentant un maximum de 55 % à 400°, puis redescend lentement jusqu'à 40 % à 575° et remonte rapidement pour atteindre 99 % vers 800° et tendre ensuite vers 100 %. Elle s'annule à 1350°

0 0 0



Fig. 28 — Portion de la figure 27 grossie 40 fois, montrant le décollement des grains de perlite.

section de l'échantillon après rupture. Au contraire, après traitement, et à fortiori, après laminage, la ferrite en excès est rejetée hors de la perlite, permettant ainsi une striction beaucoup plus importante, proportionnée à la teneur en C.

Dès que le métal a passé le point AI, l'apparition de l'austénite rapproche la structure du métal brut de coulée de celle du métal traité, d'où l'analogie des courbes au-dessus de 775°.

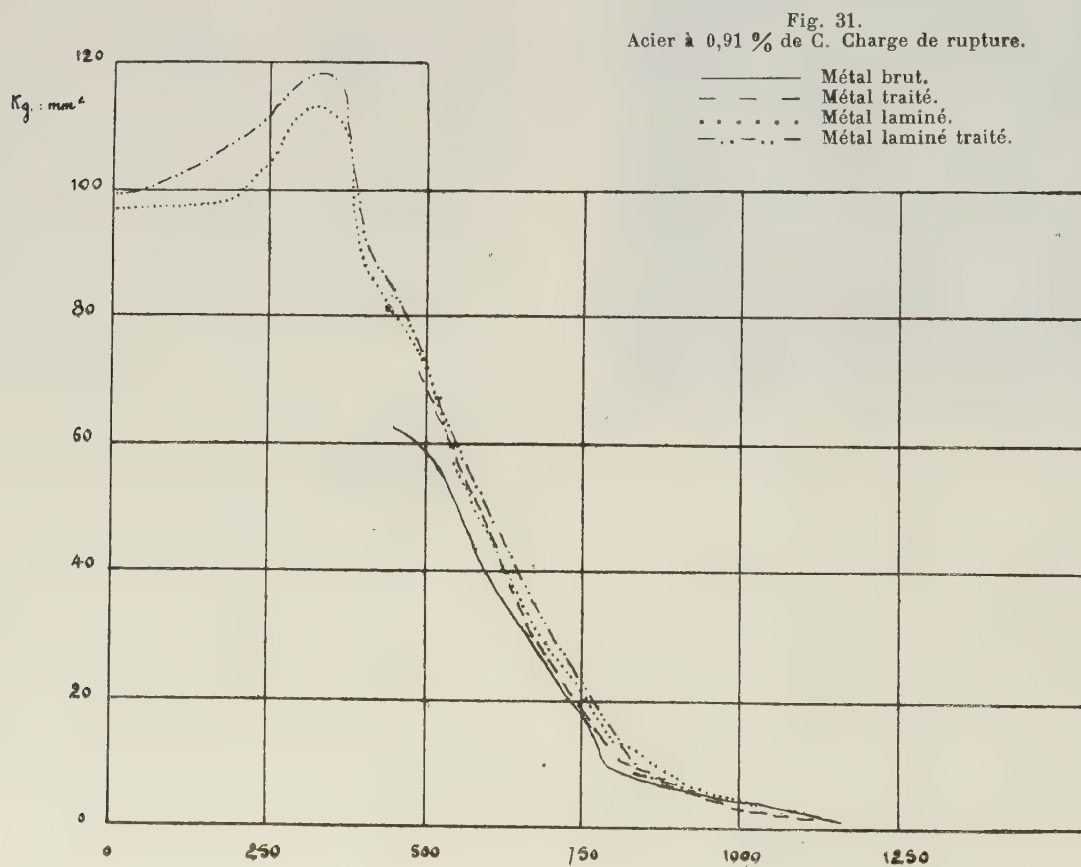
LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

SÉRIE 45.

MÉTAL BRUT

Acier à 0,91 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
45 D 1	à froid	63,6	4,4	45 D 3	765°	16,7	8,6
B 1	450°	62,4	4,4	D 2	780°	12	53,7
B 6	500°	59,7	5,3	D 5	800°	9,35	79,1
A 8	550°	50,1	5,8	D 10	850°	7,7	98
D 4	600°	38,8	7,3	C 6	900°	6,5	97,5
D 7	650°	31	7,9	B 14	1000°	4,35	98,8
A 12	700°	24,1	6,3	C 2	1150°	1,7	100
D 9	750°	17,4	8,6	2 45	1350°	0	0

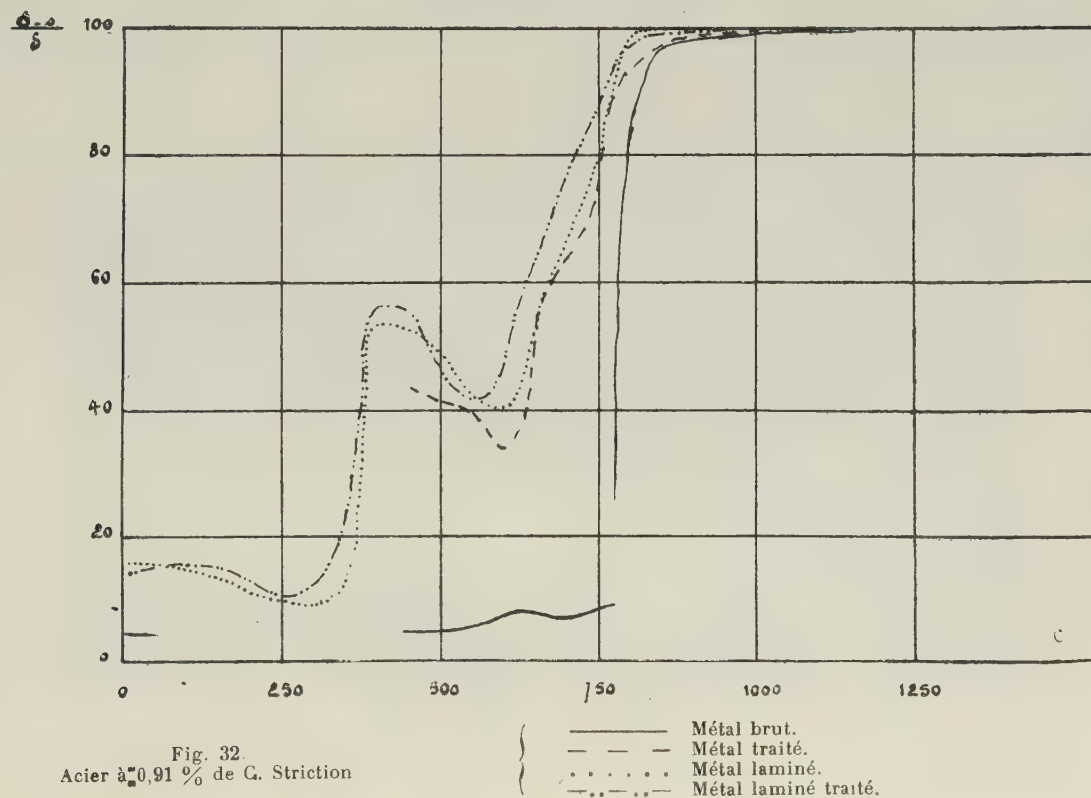


SÉRIE 45.

MÉTAL TRAITÉ

Acier à 0,91 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
45 B 18	à froid	101,6	8,6	45 C 5	750°	19	72,1
B 15	450°	69,7	43,3	D 6	775°	14,3	89,8
A 10	487°	71,6	41,1	D 8	800°	13	93
B 8	550°	56,8	39,3	A 7	850°	15,6	81
A 11	600°	45,1	33,1	B 4	850°	8,2	84,1
B 9	625°	43,5	36,5	A 6	900°	6,7	94
C 8	650°	31,4	54,7	B 17	950°	4,35	99,1
A 9	700°	26,1	62,5	A 2	1100°	2,15	99,6



LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

SÉRIE 45.

MÉTAL LAMINÉ

Acier à 0,91 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
45 L 7	à froid	96,9	16	45 L 7	550°	52,1	41,1
L 31	175°	97,6	12,8	L 6	600°	49,5	39,9
L 32	250°	103,3	10	L 5	650°	36,1	55,6
L 30	325°	113,3	10	L 3	700°	27	67,2
L 25	375°	109,7	31,8	L 2	750°	22,1	82,6
L 10	400°	87,6	53,7	L 4	800°	13,2	98,5
L 9	450°	78,2	51,8	L 11	950°	5,2	99,7
L 8	500°	72,3	48,6	L 12	1000°	3,01	99,99

SÉRIE 45.

MÉTAL LAMINÉ TRAITÉ

Acier à 0,91 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S - S'}{S}$ %
45 L 19	à froid	99,8	14	45 L 14	550°	59,7	41,1
L 27	175°	106,3	14	L 23	600°	50,1	45,7
L 26	250°	110,4	10	L 15	650°	38,7	61,6
L 28	325°	118	14,7	L 13	700°	30,1	77,8
L 29	375°	113,6	35,3	L 20	750°	23,4	89,8
L 18	400°	92,2	55,6	L 21	800°	13,7	97,4
L 17	450°	84,7	55,2	L 22	825°	11,2	98,8
L 16	500°	69,7	46,5	L 24	900°	6,34	99,9

Acier à 1,25 % de C.

Brut de coulée, l'acier à 1,25 % de C est extrêmement fragile à froid. Pour certains barreaux, la rupture s'est produite dans la partie des têtes ayant 25 mm. de diamètre sans que le corps du barreau à 13,8 mm. de diamètre n'ait subi de déformation mesurable. Les ruptures régulières ne commencent à se produire qu'au-dessous de 500°.

La charge de rupture, partant de 102 kg. : mm² pour le métal brut de coulée traité et de 106 kg. : mm² pour le métal laminé et traité, s'élève rapidement jusque vers 300°, température pour laquelle elle atteint 110 kg. : mm² pour le métal brut de coulée traité et 130 kg. : mm² pour le laminé traité. Elle descend ensuite régulièrement jusqu'aux environs de 18 kg. par mm² à 760°. A cette température la courbe présente une très légère dis-

continuité suivie de quelques ondulations peu marquées. Elle s'abaisse ensuite lentement jusque vers 1350° où elle passe brusquement de 3 kg. : mm^2 à 0.

Les courbes de strictions sont plus accidentées. Pour le métal brut de coulée, la courbe de striction part de 0 à 490° . Elle s'élève en présentant quelques ondulations jusqu'à 775° , température pour laquelle elle est de 7,5 %. Elle se maintient ensuite aux environs de 15 % jusqu'à 875° et, après une petite ondulation, s'élève jusqu'à 99 % vers 1200° . Dans le cas du métal traité ou laminé, la striction, voisine de 5 % à froid, s'élève jusque vers 20 % de 300° à 450° et se maintient au voisinage de cette valeur jusqu'à 775° , fléchissant toutefois un peu vers 600° . A ce moment elle s'élève brusquement, se maintient aux environs de 45 % jusqu'à 875° (30 % dans le cas du métal coulé traité) puis se remet à croître pour atteindre 99 % vers 1000° . Vers 1350° , elle tombe brusquement à zéro.

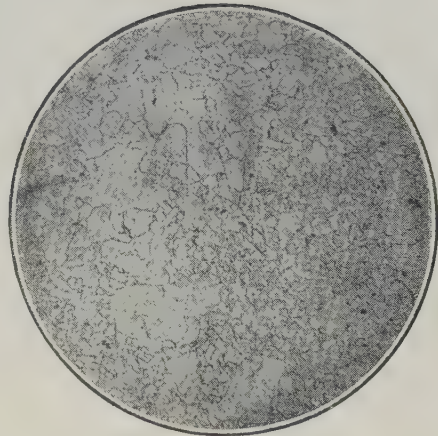
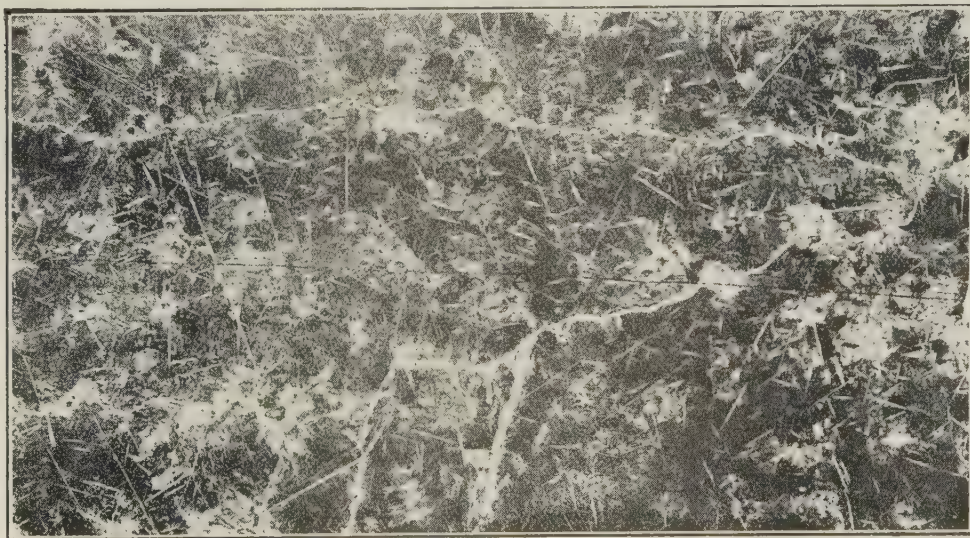


Fig. 36. — Acier à 1.25 % de C.
Structure du métal traité.
Attaque : picrate de soude.

× 37

Fig. 35. — Acier à 1,25 % de C. Structure du métal brut. Attaque AzO^3H alcoolique.

× 37.



→ Vers le grand axe du lingot

LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

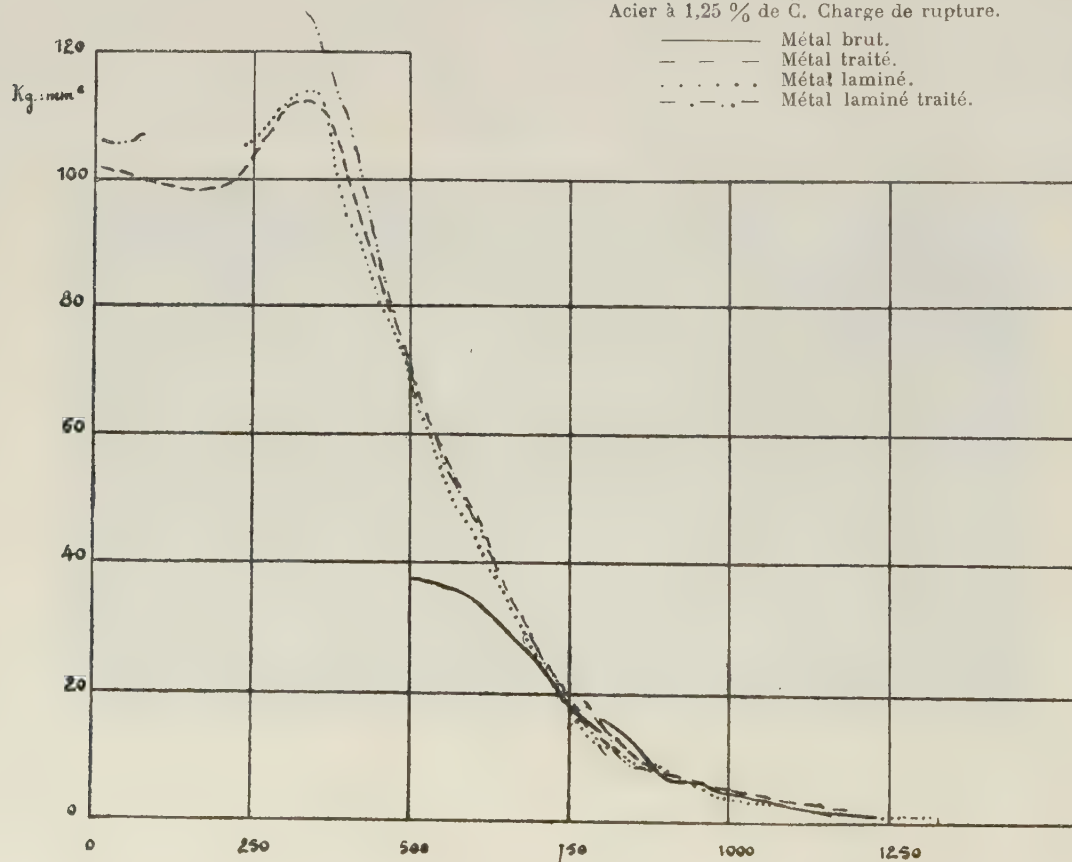
SÉRIE 37.

MÉTAL BRUT

Acier à 1,25 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg. cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
37 C 19	à froid	38,5	0	37 C 15	825°	14,35	14
C 9	600°	35,3	1	A 7	860°	12,0	15,4
D 8	646°	29,8	3,1	A 9	900°	6,7	24,5
A 18	700°	25,2	3,7	D 9	950°	6,5	21,9
B 4-1	725°	21	3,1	C 1	985°	5,0	25,8
C 18	750°	16,6	4,5	B 7	1000°	4,7	34,2
B 6	775°	15,6	7,3	D 5	1075°	3,3	61
A 12	800°	14,7	15,4	B 4	1100°	3	70
C 16	810°	16,3	14	D 3	1200°	1,7	99

Fig. 33.
Acier à 1,25 % de C. Charge de rupture.

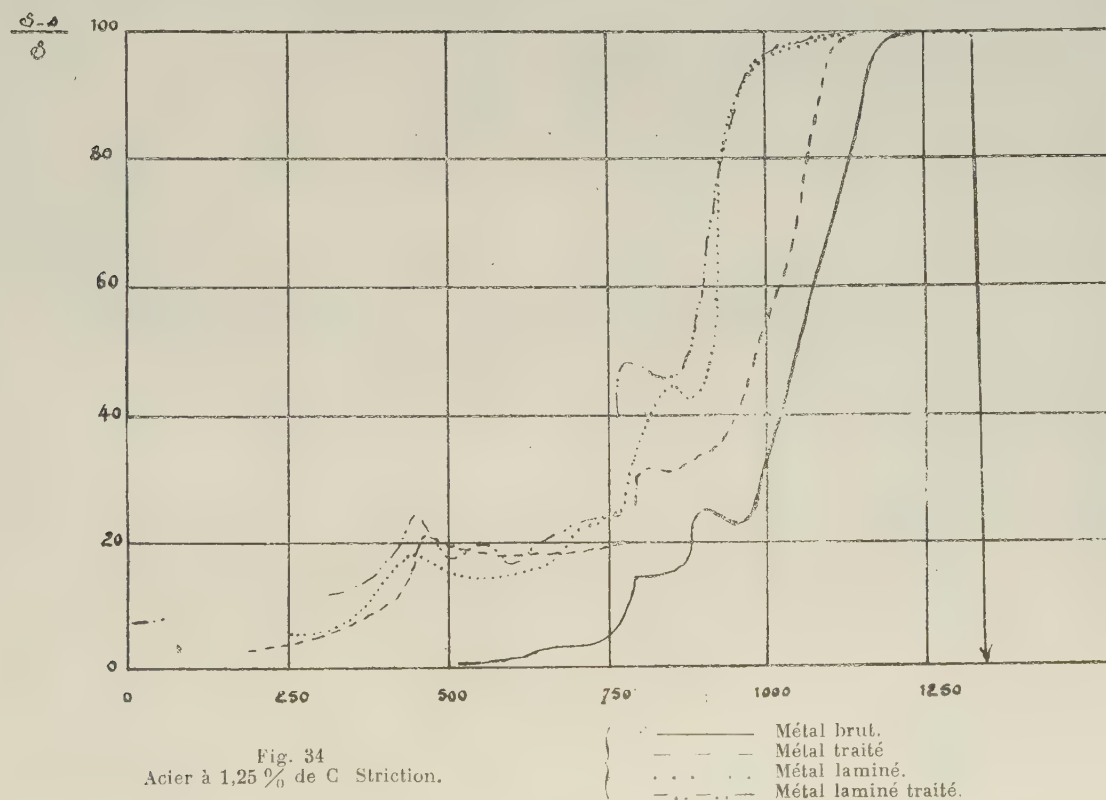


SÉRIE 37.

MÉTAL TRAITÉ

Acier à 1,25 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
37 D 1	à froid	102	3,1	37 A 4	800°	13,8	29,4
C 6	200°	98,5	3	A 15	825°	12,4	31,8
A 5	305°	115,6	5,1	D 6	845°	10	30,6
C 11	425°	92,5	11,4	D 2	900°	7,3	33,6
A 17	450°	85,9	20,6	A 8	925°	6,6	34,4
A 2	500°	68,2	18,6	C 14	950°	5,7	40,8
A 7	600°	48	16,7	C 17	1000°	4,35	52,7
A 3	700°	26,2	18	C 3	1050°	3,9	68
C 12	750°	17	19,3	C 13	1100°	2,8	95,8
C 4	775°	18,4	19,3				



LES ACIERS AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES

SÉRIE 37.

MÉTAL LAMINÉ

Acier à 1,25 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
37 L 50	250°	106	5,8	37 L 34	775°	13,7	26,9
L 35	325°	113,34	5,8	L 35	800°	11,4	36,5
L 7	400°	93,2	14	L 30	825°	11,04	39,3
L 5	450°	81,6	17,5	L 28	850°	9,02	44,3
L 12	500°	69,4	14,7	L 40	880°	9,2	42,2
L 14	550°	47,1	14	L 38	925°	6,15	75,7
L 13	600°	45,8	14,7	L 31	975°	3,9	93,1
L 9	650°	35,4	16	L 33	1050°	3,01	96,4
L 26	700°	24,4	21,9	L 47	1365°	0	0
L 27	750°	17,6	23,2				

SÉRIE 37

MÉTAL LAMINÉ TRAITÉ

Acier à 1,25 % de C.

Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %	Eprouvette n°	Température	Charge de rupture Kg./cm ²	Striction $\frac{S-S'}{S}$ %
37 L 8	à froid	106	7,3	37 L 15	800°	11,04	49,6
L 39	350°	124,9	12	L 46	800°	12,03	47
L 32	400°	109	15,4	L 18	825°	10,7	45,4
L 1	450°	78,8	24,5	L 20	850°	8,82	45
L 10	500°	73	17,3	L 49	875°	8,56	48
L 3	550°	53,5	19,3	L 21	900°	7,34	58,4
L 16	600°	47,8	15,5	L 41	925°	6,5	76,4
L 6	650°	36,4	20	L 22	950°	5,35	86,9
L 4	750°	17,1	23,2	L 44	1000°	4,01	96,9
L 19	775°	15	46,5	L 38	1050°	3,17	97

o o o

Si nous examinons l'ensemble des résultats se rapportant aux diverses nuances d'acier, nous voyons que, lorsque la température croît, la charge de rupture commence par éprouver une légère diminution. Elle se relève ensuite et présente un maximum vers 300° , c'est-à-dire dans la région du « bleu ». A partir de ce moment commence une décroissance régulière, avec peut être une légère anomalie aux environs de 450° - 550° , qui se prolonge jusqu'à un peu au-dessous de 750° . Il se produit alors une discontinuité, suivie d'abord pour les aciers hypoeutectoïdes d'une légère diminution de la charge de rupture, puis d'un relèvement, donnant à la courbe représentative une forme en U caractéristique; après un point de rebroussement, la charge de rupture recommence à diminuer jusqu'à l'apparition du liquidus où elle tombe brusquement à zéro. Dans le cas de l'acier eutectoïde, la branche en U n'existe pas, tandis qu'elle est remplacée pour l'acier hypereutectoïde par une courbe présentant un point d'inflexion vers 875° .

Ces divers accidents sont encore plus marqués dans le cas des courbes de striction. Nous remarquons en effet d'abord une légère décroissance de la diminution de striction, avec un minimum vers 300° correspondant au maximum de la courbe de charge de rupture. Il se produit ensuite vers 450° un relèvement rapide et d'autant plus marqué que le métal contient moins de ferrite. Après un léger palier, la striction diminue légèrement pour remonter ensuite jusque vers 775° . A partir de ce moment, les diverses nuances d'acier se comportent de façon différente suivant leur teneur en carbone. Dans le cas des métaux doux, après une augmentation assez sensible, la courbe de striction diminue rapidement jusqu'à 875° . Elle présente ensuite quelques ondulations et atteint 100 % aux environs de 1050° pour tomber à zéro en même temps que la charge de rupture.

Le minimum de la région de 900° est d'autant moins marqué que la teneur en carbone s'élève; et, pour l'acier eutectoïde, la courbe de striction

commence à se relever dès 600° pour atteindre 100 % vers 760° . Pour l'acier à 1,25 % de carbone, nous retrouvons à nouveau une branche de courbe presque horizontale formant palier entre les régions à faible striction (températures inférieures à 760°) et celles pour lesquelles elle atteint 100 %.

Pour résumer ces résultats, nous avons construit pour le métal brut de coulée la surface striction — teneur en carbone — température (fig. 37). Le solide ainsi obtenu permet de mieux se rendre compte de la façon dont varient ces propriétés en fonction des deux autres variables.

De quelle façon ces résultats peuvent-ils s'accorder avec le diagramme d'état des alliages fer carbone ?

Nous rencontrons d'abord pour toutes les nuances d'acier expérimentées un premier accident vers 750° . Cette température est voisine de celle correspondant au point Ac_1 pour des vitesses de chauffage de l'ordre de celle adoptée dans nos expériences. De plus dans le cas de l'acier à 0,9 de C, c'est-à-dire ne présentant qu'un point de transformation, cet accident est le seul que nous observons. L'examen des éprouvettes d'acier extra-doux permet de voir qu'au-dessus de cette température le métal contient encore de la ferrite. A froid, ainsi que l'on sait, la traction commence par déformer les cellules de ferrite qui s'allongent dans le sens de l'effort; dans le cas de métal brut de coulée, pour lequel les éléments cellulaires sont d'une grosseur exceptionnelle, le barreau, d'abord poli prend un aspect martelé caractéristique. Or, si nous cherchons pour quelle température de rupture cet aspect disparaît, nous voyons (fig. 38) que ce n'est qu'à 860° que l'on cesse d'observer ce mode de déformation particulière de la ferrite.

L'accident de 750° correspondrait donc bien à la disparition de la perlite, transformée en austénite à 0,9 % de C, c'est-à-dire au point A_1 .

Les aciers extra-doux présentent, entre 750° et 860° , un nouveau changement dans leurs propriétés; mais, contrairement à ce qui se produit pour A_1 , le passage se fait progressivement. Or, ainsi que nous venons de le voir, c'est à cette dernière température que l'on observe une transfor-

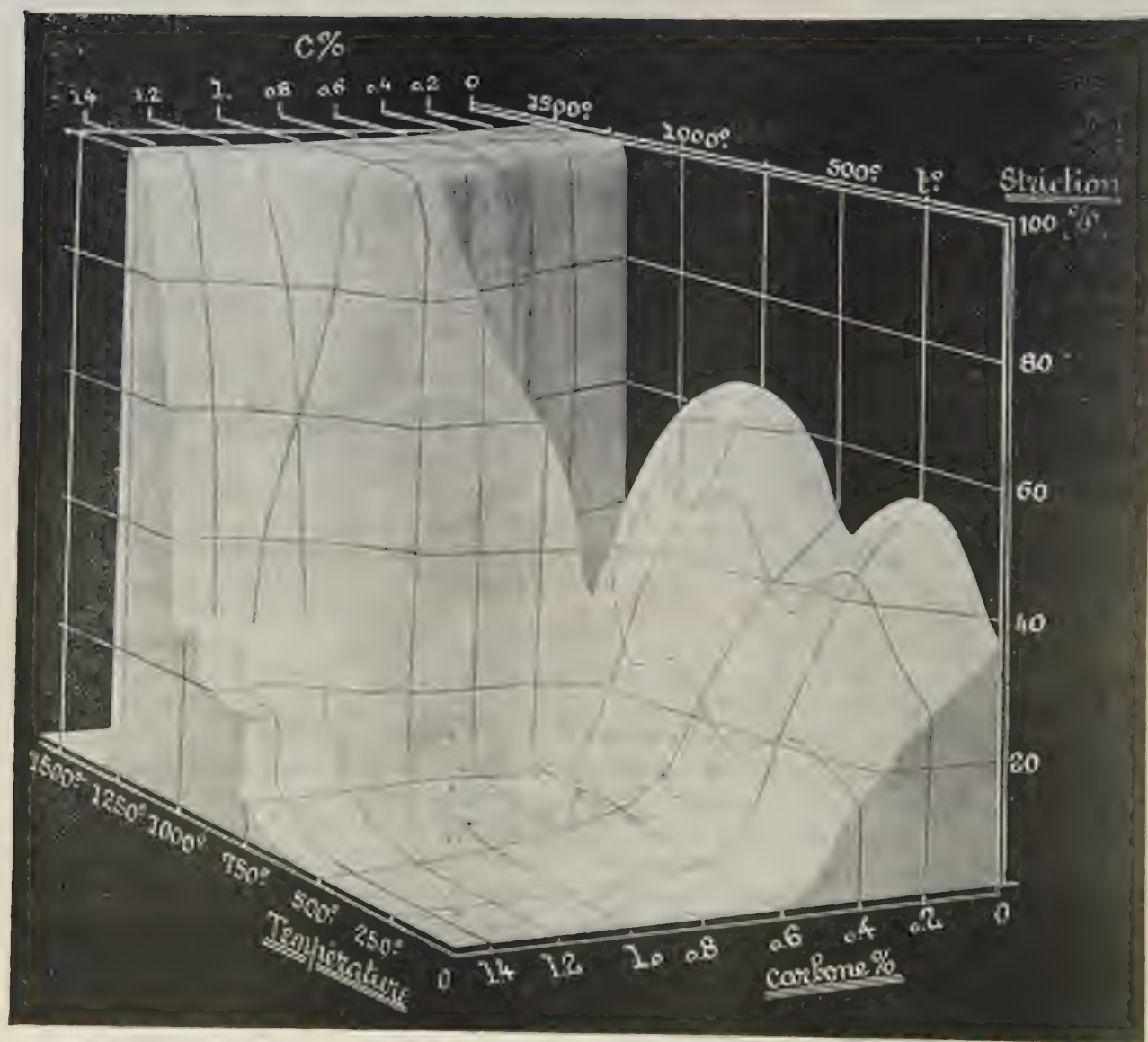


Fig. 37. — Métal brut de coulée. Surface. Température Teneur en carbone. Striction.

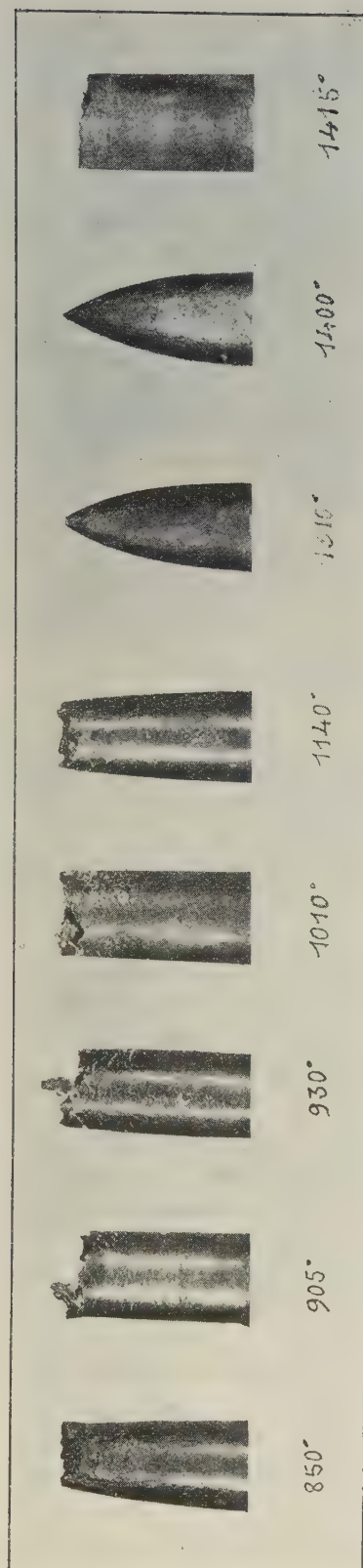


Fig. 38. — Acier à 0,15 % de C. Métal brut. Aspect des barreaux cassés à diverses températures.

mation dans l'aspect extérieur des barreaux, le « martelage » disparaissant vers 860°. L'allure de cette variation présente une grande analogie avec celle du magnétisme qui diminue progressivement dans ce même intervalle, c'est-à-dire jusqu'au point Ac^2 . Il semble donc y avoir correspondance entre la variation et ce point de transformation.

Au-dessus de Ac^2 , l'aspect de l'éprouvette cassée n'est plus le même : la rupture se produit en quelque sorte par décollement des grains presque sans déformation, le métal cédant à la façon d'un tube de caoutchouc sec. Ce phénomène, particulièrement net dans le cas du métal extra-doux, va en s'atténuant lorsque la teneur en carbone augmente.



Fig. 39. — Acier à 0,55 % de C. Métal laminé. Aspect des barreaux cassés à diverses températures.

L'acier à 0,55 % de C ne présente plus cette variation de propriété correspondant à Ac^2 . La cassure au-dessus de 760° passe progressivement de l'aspect lisse à l'aspect craquelé (fig. 39, barreaux 1, 2, 3).

Comment expliquer cette variation du mode de déformation avant rupture ? Il est nécessaire de se rappeler que l'on a affaire à une matière hétérogène.

Au-dessus de Ac_1 , les aciers hypoeuctectoïdes sont formés de grains de ferrite à l'état α ou à l'état β (nous n'employons cette dernière dénomination que pour désigner l'état du métal entre les

deux lignes A^2 et A_3 du diagramme, sans lui donner la signification d'un état allotropique) enrobés dans un réseau d'austénite provenant de la transformation de la perlite. Lorsqu'il y a juxtaposition d'éléments de plasticité et de solidité différentes, les propriétés mécaniques observées, s'il n'y a pas enchevêtrement de ces éléments, sont celles de celui des constituants qui est le moins solide. Comme nous allons le voir, l'austénite est éminemment plastique. Dans le mélange avec la ferrite, transformée ou non transformée, mais présentant une résistance mécanique plus élevée, elle jouera le rôle de liant déformable, à la façon du constituant de fond dans un anti-friction.

Lorsqu'il y a très peu de carbone (acier à 0,15 % de C), le réseau d'austénite présente des lacunes; les propriétés mécaniques sont donc intermédiaires entre celles des deux constituants. Comme leurs résistances sont peu différentes l'une de l'autre, la ferrite subit un commencement de déformation avant que la rupture ne se produise. L'examen des diagrammes montre que dans la région comprise entre A_1 et A_2 ou A_3 , la charge de rupture ne varie que peu avec la teneur en carbone, la striction ayant également des valeurs de même ordre pour des éprouvettes ayant subi les mêmes traitements.

La région A_2 - A_3 se caractérise par un relèvement de la charge de rupture, le métal cassant presque sans déformation. Si l'on admet qu'à l'état β la ferrite a une limite d'écoulement plus élevée qu'au-dessous de Ac_2 , il en résultera que la rupture se produira dans le joint d'austénite avant que la ferrite n'ait commencé à se déformer. Pour le métal extra-doux, par suite de la faible dimension des joints plastiques, la rupture se produira sans déformation sensible du métal, c'est-à-dire avec une très faible striction.

C'est à cette zone que correspond la région de fragilité signalée dans le cas de forgeage du métal.

Aux températures élevées, la charge de rupture est très faible; le métal est complètement plastique, les éprouvettes cassées présentent une pointe, aiguë comme celle d'une aiguille, correspondant à une striction de 100 %. Cette région correspond

à celle de l'austénite. Ce n'est qu'au-dessous d'une température voisine de A_3 que cette plasticité diminue.

L'acier à 1,25 % de C ne passe pas directement des propriétés mécaniques correspondant à la striction perlitique à la plasticité de la région austénique. C'est qu'en effet, ce métal contient un excès de cémentite qui est encore stable au-dessus de $A_{(1, 2, 3)}$. L'état plastique ne correspond qu'à sa dissolution totale, c'est-à-dire au point Acm.

Enfin, l'apparition du liquidus, enlevant toute consistance à l'acier, le fait se rompre sans déformation pour une charge infiniment faible, à la façon du sable mouillé.

CONCLUSIONS

Nous avons, à l'origine de cette étude, pris comme caractéristique des propriétés mécaniques aux diverses températures les valeurs de la charge de rupture et de striction.

Les résultats obtenus semblent montrer que le mécanisme de la rupture n'est pas le même aux diverses températures.

Les chiffres trouvés ne mesurent donc pas toujours le même phénomène : il faut considérer le tracé représentatif de la charge de rupture ou de la striction non comme une courbe unique présentant un certain nombre de points singuliers, mais bien comme une suite de courbes différentes tracées à la suite l'une de l'autre sur un même diagramme.

Le phénomène observé est donc assez complexe, car, en dehors de la température et de la composition, il faut faire intervenir la nature et la constitution physique des éléments constituant l'aggrégat.

En résumé, les aciers peuvent être divisés de la façon suivante :

1°. Au-dessous de A_1 : (et de A_2 à la limite) :

Acier extra-doux : ferrite se déformant par cli-vage avant rupture.

Aciers hypoeutectiques : la ferrite seule se dé-

forme de façon sensible, la rupture se produisant lorsque les îlots de perlite viennent au contact.

Aciers eutectiques : rupture presque sans déformation.

Aciers hypereutectiques : fragilité due à la présence de cémentite.

2° Région austénitique :

Quelle que soit sa teneur en carbone, le fer γ est complètement plastique.

3° Région comprise entre A_1 et A_2 :

Plasticité croissante avec la teneur en fer γ .

4° Région comprise entre A_2 et A_3 :

Rupture presque sans déformation par suite de la faible teneur en fer γ et de la fragilité du fer dans la région β .

5° Apparition du liquide :

Chute brusque et simultanée de la charge de rupture et de la plasticité.

Nous avons effectué les recherches que nous venons de décrire de Janvier à Septembre 1920 au Laboratoire d'Etudes Métallurgiques de la Compagnie des Forges de Châtillon, Commentry et Neuves-Maisons, à Montluçon, placés sous la direction de M. Girard, chef de service du Contrôle, et des Etudes Métallurgiques. Nous le remercions des facilités qu'il a bien voulu nous donner pour l'exécution de ce travail. Nous exprimons également notre reconnaissance à notre éminent Maître M. Henry Le Chatelier dont les précieux conseils nous ont maintes fois éclairé et guidé au cours de notre étude.

Le 4 octobre 1920.

ooo



DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Les propriétés magnétiques des alliages.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 27 janvier 1921

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

M. MOLLIARD.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

P. APPELL.

